Produktions- und kostentheoretische Beurteilung des Modal-Split im städtischen Pendlerverkehr

Dissertation

der Rechts- und staatswissenschaftlichen Fakultät der
Universität Zürich
zur Erlangung der Würde eines Doktors
der Wirtschaftswissenschaften

vorgelegt von
BRUNO PORRO
von Chiasso

genehmigt auf Antrag
der Herren Prof. Dr. G. Hauser und Prof. M. Rotach

1979

Produktions- und kostentheoretische Beurteilung des Modal-Split im städtischen Pendlerverkehr

Dissertation

der Rechts- und staatswissenschaftlichen Fakultät der
Universität Zürich
zur Erlangung der Würde eines Doktors
der Wirtschaftswissenschaften

vorgelegt von
BRUNO PORRO
von Chiasso

genehmigt auf Antrag
der Herren Prof. Dr. G. Hauser und Prof. M. Rotach

1979

Die Rechts- und staatswissenschaftliche Fakultät gestattet hierdurch die Drucklegung vorliegender Dissertation, ohne damit zu den darin ausgesprochenen Anschauungen Stellung zu nehmen.

Zürich, den 24. Januar 1979

Der Dekan:

Prof. Dr. J. Rehberg

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Für Beatrice

Vorwort

Wie im Titel angedeutet, liegt das Schwergewicht dieser Arbeit in der produktions- und kostentheoretischen Beurteilung der Verkehrsteilung im städtischen Pendlerverkehr. Die Beschränkung auf den Personenverkehr erlaubt verschiedene Vereinfachungen in den Modellannahmen, schränkt demzufolge aber auch die Aussagekraft der Ergebnisse entsprechend ein. Insbesondere die Vernachlässigung des Güterverkehrs macht einige Modifikationen am Modell erforderlich, falls die Ergebnisse dieser Arbeit für reale Problemlösungen verwendet werden.

Die Grundlagen zu dieser Arbeit konnte ich während meiner Anstellung am Institut für Verkehrsplanung und Transporttechnik der ETH Zürich bei der Mitarbeit an einem Forschungsprojekt erarbeiten. Herrn Prof. M. Rotach, dem Leiter dieses Institutes, möchte ich an dieser Stelle besonderen Dank aussprechen für die Freiheit, die ich während der zweieinhalbjährigen Projektdauer erfahren habe sowie für die Bereitstellung der Infrastruktur des Institutes auch nach meinem Uebertritt in die Praxis. Ebenso grossen Dank schulde ich Herrn Prof. Dr. G. Hauser von der Universität Zürich, der sich als Referent dieser interdisziplinären Arbeit zur Verfügung gestellt und mich insbesondere in ökonomischen Fragestellungen unterstützt hat.

Leider ist es nicht möglich, alle Personen, die mir während der Niederschrift dieser Arbeit in irgendeiner Art behilflich waren, namentlich aufzuführen. Allen Mitarbeiter städtischer, kantonaler und eidgenössischer Amtsstellen, die meine Anfragen wo immer möglich zu beantworten suchten, sei hiermit herzlich gedankt. Besondere Anerkennung möchte ich Herrn Dr. H.J. Büttler vom Institut für Bauplanung und Baubetrieb für seine kritischen Bemerkungen zum Arbeitsentwurf, Herrn Dr. A. Müller vom Institut für Hydraulik und Wasserwirtschaft für die Unter-

stützung bei der mathematischen Behandlung der Produktionsfunktion und den Herren B. Ranft und F. Karli vom Institut für Verkehrsplanung und Transporttechnik für die Hilfe bei der Programmierung aussprechen. Danken möchte ich auch Frl. U. Hutter, welche die Reinschrift dieser Arbeit besorgte; Frau A. Wahl, die mich meisterhaft um alle bürokratischen Klippen lotste; den Mitarbeitern der Baubibliothek für die grosszügige Ausleihpraxis und Herrn Richard R. Doerr, meinem direkten Vorgesetzten bei der Schweizerischen Rückversicherungsgesellschaft, der mir für die Abschlussarbeiten die notwendige Zeit einräumte.

Inhaltsverzeichnis

1. Allgemeines 11
11. Begriffe 11
12. Die Entwicklung des schweizerischen Verkehrswesens 11
13. Der Agglomerationsprozess 17
14. Problemstellung und Vorgehen 21

2. Grundlagen 23
21. Verkehrstechnische Grundlagen 23
211. Der Verkehrsablauf 23
212. Das Fundamentaldiagramm 24
213. Die Produktionsfunktion 27
2131. Produktionsfunktion für Verkehrsmittel ohne Fahrtunterbruch 28
2132. Produktionsfunktion für Verkehrsmittel mit Fahrtunterbruch 30
2133. Produktionsfunktion für beide Verkehrsmittel 32
214. Diskussion der Produktionsfunktion 35
215. Numerisches Beispiel 43
22. Kostenrechnerische Grundlagen 49
221. Begriffe 49
222. Die Internalisierung von externen Effekten 51
223. Kompensationszahlungen 53
224. Die Bewertung von externen Effekten 56
225. Einfluss der Rechtslage auf die Bewertung externer Effekte 57
226. Die Bewertung von externen Effekten mit Hilfe ökonometrischer Methoden 60
227. Zusammenfassung 62

3. Ermittlung der Verkehrskosten 63
31. Die Betriebskosten der Verkehrsmittel 63
311. Die Betriebskosten des repräsentativen Personenwagens 65
3111. Treibstoffverbrauch 65
3112. Oelverbrauch 69
3113. Reifenverbrauch 69
3114. Fahrzeugunterhalt 71
3115. Abschreibungen 72
3116. Betriebskosten pro Fahrzeugkilometer 72
312. Die Betriebskosten des Busses 74
32. Die Betriebskosten des Verkehrsträgers 79
321. Grundsätzliches 79
322. Die Schweizerische Strassenrechnung 80
323. Weitere Kostenzurechnungsprinzipien 83
33. Zeitkosten 84
331. Begriff 84
332. Arbeitszeit 85
333. Nichtarbeitszeit 86
334. Ansätze zur Zeitbewertung 87
3341. Nutzentheoretische Ansätze 88
3342. Verhaltensorientierte Ansätze 88
3343. Sozialpsychologische Ansätze 90
335. Empirische Untersuchungen 91
336. Folgerungen 93
34. Unfallfolgekosten 95
341. Die Erfassung des Unfallgeschehens 95
3411. Die amtlichen Statistiken 96
3412. Die Analyse von Zeitreihen 97
3413. Empirische Untersuchungen 99
342. Die Bewertung der Unfallfolgen 102
35. Lärmvermeidungskosten 107
351. Messung des Verkehrslärms 107
352. Berechnung des Verkehrslärms 108

353. Wirkungen des Verkehrslärms 112
354. Bewertungsansätze 113
355. Einfluss der Verkehrsteilung auf die Höhe des Lärmpegels 115
36. Abgasvermeidungskosten 117
361. Abgasemissionen 119
3611. Benzinmotor 119
3612. Dieselmotor 121
362. Abgasimmissionen 122
363. Wirkungen auf den Menschen 124
364. Immissionsgrenzwerte 126
365. Bewertungsansätze 127

4. Bestimmung der kostenminimalen Verkehrsteilung 132
41. Kostengleichung 132
42. Kostenfunktion 135
43. Annahmen für die numerische Berechnung 136
431. Betriebskosten Bus 136
432. Betriebskosten Verkehrsträger 137
433. Zeitkosten 138
434. Unfallfolgekosten 139
44. Numerisches Beispiel 145
441. Reiner Individualverkehr 145
442. Individuelle und öffentliche Verkehrsmittel 147

5. Massnahmen zur Beeinflussung der Verkehrsteilung 157
51. Bestimmungsgrössen der Verkehrsmittelwahl 158
52. Diskussion einiger Massnahmen 160
521. Ausgangslage 160
522. Beeinflussung von Parametern der Produktionsfunktion 160
523. Investitionspolitische Massnahmen 162
524. Massnahmen beim ruhenden Verkehr 164
525. Preispolitische Massnahmen 165

Variablenverzeichnis 167
Abkürzungsverzeichnis 170
Literaturverzeichnis 171
Mit Autorenangabe 171
Ohne Autorenangabe 180

1. Allgemeines

11. Begriffe

Nach Predöhl (1961) umfasst der Begriff Verkehr in seiner engeren wirtschaftlichen Bedeutung die Gesamtheit aller Vorgänge, welche im Bereiche der Wirtschaft der Raumüberwindung dienen. In diesem Sinne sind zum Verkehr der Transport von Personen, Gütern und Nachrichten in jeder Form, zu Wasser, zu Lande und zur Luft zu zählen.

Für unsere Zwecke werden wir den Verkehrsbegriff enger fassen. Wir beschränken uns auf den Landverkehr und auf den Transport von Personen, also den Personenlandverkehr oder kurz den Personenverkehr. Diesen unterteilen wir in individuellen (privaten) und öffentlichen Personenverkehr. Unter Individualverkehr fassen wir jenen Verkehr zusammen, der sich mit eigenem Verkehrsmittel auf öffentlichen Verkehrsanlagen abspielt. Die Begriffe Individualverkehr und Privatverkehr werden synonym verwendet.

Unter Verkehrsleistung wird im folgenden das pro Zeiteinheit gemessene Produkt aus Beförderungs- und Längeneinheit verstanden. Für den Personenverkehr lautet die entsprechende Messgrösse z.B. Pers.km/h.

12. Die Entwicklung des schweizerischen Verkehrswesens

Für das vergangene Vierteljahrhundert sind nach den Statistiken der GVK (7) und des EAV (1975) folgende Entwicklungen im schweizerischen Verkehrswesen zu verzeichnen:

- Sowohl im Personen- wie im Güterverkehr haben sich die Verkehrsleistungen im Zeitraum 1950 bis 1975 etwa verfünffacht.

- Betrachten wir die Verteilung auf die zwei wichtigsten Verkehrsträger Schiene und Strasse, die zusammen den überwiegenden Anteil auf sich vereinen, so gilt:

  · Im Personenverkehr sank der Anteil des Schienenverkehrs an der gesamten Verkehrsleistung im erwähnten Zeitraum von 52 % auf 12 %.

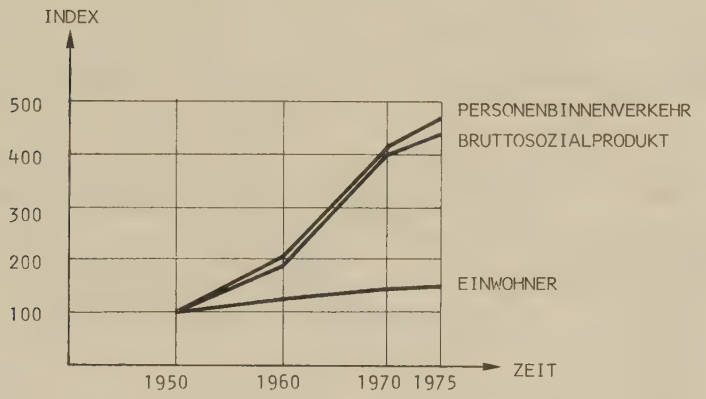
  · Im Güterverkehr hat der Anteil des Schienenverkehrs in der gleichen Periode um 22 %, nämlich von 70 % auf 48 %, abgenommen.

Da sich die Einwohnerzahl der Schweiz von 1950 bis 1975 nur um ca. 35 % von 4,7 auf 6,4 Mio. erhöhte, muss die Häufigkeit von Beförderungsfällen und/oder die Reiseweite pro Fahrt zugenommen haben. Nach Schätzungen der GVK (7) nahm die Verkehrsleistung im schweizerischen Binnenverkehr (d.h. ohne Fahrten in die bzw. aus der Schweiz und durch die Schweiz) pro Kopf der Bevölkerung sehr stark zu, nämlich von 2770 km im Jahre 1950 auf 8550 im Jahre 1970. Im Güterverkehr stieg der Transport von 19 auf 56 Tonnen pro Kopf an (GVK (84, S. 307).

Einer der Hauptgründe für die starke Zunahme der Verkehrsleistungen ist unbestrittenermassen im wachsenden materiellen Wohlstand zu suchen. Die äusserst unterschiedlichen Wachstumsraten des Personenverkehrs auf den Verkehrsträgern Schiene und Strasse lassen vermuten, dass die durch den Besitz individueller Verkehrsmittel verbesserte Mobilität wesentlich zur Steigerung der Fahrleistungen beigetragen hat.

Verfolgen wir die Entwicklung des Bruttosozialproduktes, des Personenwagenbestandes und der Personenverkehrsleistungen über die Jahre 1950 bis 1975 in Abbildung 1.1, so ist die parallele Entwicklung von BSP und Verkehrsleistung augenfällig:

Abbildung 1.1: Entwicklung des Bruttosozialproduktes, der Einwohnerzahl und des Personenbinnenverkehrs in der Schweiz, 1950 - 1975



Quellen: GVK (7, s. 85), GVK (13 A), Perspektiven (1974, S. 79)

In diesem Zeitraum ist der Verkehrssektor zu einem bedeutsamen Faktor der schweizerischen Volkswirtschaft geworden. In einer von der Prognos für die GVK (84) ausgearbeiteten Studie finden sich für 1970 folgende Angaben über die vom Verkehr abhängigen Beschäftigten (GVK (84, S. 307)):

Im Verkehrssektor Beschäftigte mit anderen Berufen als des Verkehrs	92 988
Im Verkehrssektor Beschäftigte mit Berufen des Verkehrs	102 538
Beschäftigte mit Berufen des Verkehrs in Betrieben übriger Sektoren	62 976
Total	258 502

Gemessen an den schweizerischen Erwerbstätigen 1970 betrug der Anteil 8,6 %, wobei die Polizeiangestellten, die Grenzgänger

mit Berufen des Verkehrs sowie die im Verkehrswegebau Beschäftigten nicht berücksichtigt sind.

Insgesamt wurden Arbeitseinkommen im Ausmass von 5,4 Mrd. Franken geschaffen. Tabelle 1.1 zeigt die Verteilung auf die einzelnen Verkehrsträger.

Tabelle 1.1: Arbeitseinkommen der vom Verkehr abhängigen Beschäftigten im Jahre 1970

Verkehrsträger	Einkommenseffekt des Verkehrssystems in Mio Fr.	in %
Strasse	3611,3	67,0
Schiene	1301,5	24,2
Wasser	138,7	2,6
Luft	334,1	6,2
Rohrleitungen	1,7	-
Total	5387,3	100,0

Quelle: GVK (84, S. 321)

Betrachten wir die Aufwendungen für die Verkehrsträger Schiene und Strasse ohne externe Kosten, so ergeben sich nach Meyer (1977) für 1974 folgende Werte (in Mio. Fr.):

Strasse		
Wegekosten gemäss Strassenrechnung	2622	
Benützerkosten (ohne Steuern, Versicherungen):		
Personenwagen (ohne Fahrer)	8100	
Lieferwagen (mit Fahrer)	3200	
Lastwagen (mit Fahrer)	2700	
Gesellschaftswagen und andere	1000	17622
Schiene		
Gesamtaufwand SBB	2793	
Privatbahnen	575	3368
Insgesamt		20990

Pro Kopf der Bevölkerung erhalten wir folgende Beträge (in Fr.)

Strasse	2735
Schiene	526
Total	3261

Stellen wir dem Personenwagenbestand (PW - Bestand) die öffentlich zugängliche Verkehrsfläche gegenüber, so ergeben sich die in Tabelle 1.2 berechneten Werte.

Tabelle 1.2: Entwicklung der Verkehrsfläche und des Personenwagenbestandes sowie der durchschnittlichen Verkehrsfläche pro Personenwagen

Jahr	Netzlänge in 1000 km			PW-Bestand	Verkehrsfläche	
	National-strassen	Kantons-strassen	Gemeinde-strassen	(in 1000)	km^2	m^2/PW
1940		16,4	36,2*	66	332	5034
1950		16,9	37,2*	147	341	2319
1960	0,112	17,4	38,4	485	354	730
1965	0,309	17,4	40,1	845	367	434
1970	0,651	17,6	41,6	1239	386	311
1975	0,952	17,6	43,6	1794	404	225

Für die Berechnung der Verkehrsfläche wurden folgende durchschnittliche Fahrbahnbreiten eingesetzt:

Nationalstrassen 21 m
Kantonsstrassen 7 m
Gemeindestrassen 6 m

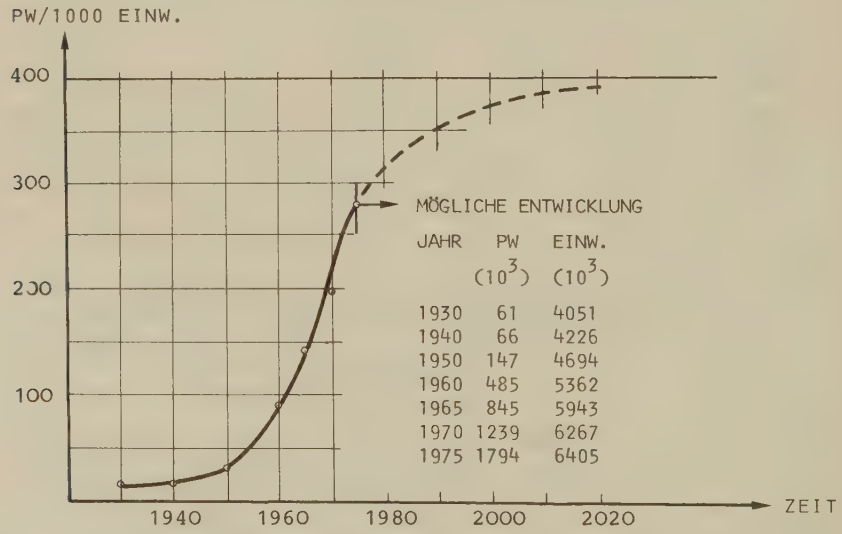
* Schätzung

Quellen: EAV (1975), JbCH (1977)

Wie wir den Zahlen der letzten Kolonne entnehmen können, hat sich die pro Personenwagen zur Verfügung stehende Fläche trotz erheblichem Ausbau des Strassennetzes in den vergangenen 35 Jahren auf einen Zwanzigstel reduziert. Wir können feststellen, dass sich der Strassenraum von einem freien, ohne nennenswerte Einschränkungen verfügbaren zu einem knappen, ökonomisch relevanten Gut entwickelt hat.

Mit welchem zukünftigen Verlauf ist zu rechnen? Die Grösse des schweizerischen Binnenverkehrs konnte durch die GVK (7) für den Zeitraum 1950 - 1970 sehr gut mit der Entwicklung des realen BSP pro Kopf erklärt werden. In der Zukunft werden sich vermehrt Sättigungserscheinungen bemerkbar machen, so dass mit abnehmenden Zuwachsraten und einer Verflachung der Gesamtverkehrsleistung gerechnet werden kann. In Abbildung 1.2 ist die bisherige Zunahme des Motorisierungsgrades (in PW/1000 Einwohner) und die mögliche zukünftige Entwicklung bei einer angenommenen Sättigung von 400 PW/1000 Einwohner dargestellt.

Abbildung 1.2: Zunahme des Motorisierungsgrades bis 1975 und mögliche Entwicklung bis 2020



Quelle: JbCH (1977)

Nehmen wir an, dass der Motorisierungsgrad zwischen 1975 und 2000 von 275 auf 400 PW pro 1000 Einwohner zunimmt, die Wohnbevölkerung von 6,405 auf 6,61 Mio. Einwohner (Perspektiven (1974, S. 79)) wächst und dass sowohl die jährliche Fahrleistung pro PW und der Besetzungsgrad unverändert bleiben, dann würde die durch Personenwagen erbrachte Verkehrsleistung sich

im gleichen Zeitraum um den Faktor

$$\frac{400}{275} \cdot \frac{6610}{6405} = 1{,}50$$

beziehungsweise von ca. 52 (GVK(7, S. 103)) auf 78 Mrd. Personenkilometer erhöhen. Da sich die Verkehrsfläche nicht im gleichen Ausmass vergrössern lässt, wird sich der pro Personenwagen zur Verfügung stehende Strassenraum weiter verknappen.

13. Der Agglomerationsprozess

Die im Abschnitt 12. aufgezeigte Entwicklung und der vermutliche zukünftige Verlauf beziehen sich auf die ganze Schweiz. Zusätzliche Erschwernisse im Verkehrsablauf, d.h. eine Verschärfung des globalen Trends, werden sich aus strukturellen Gründen im Agglomerationsbereich ergeben. Nach JbSZ (1976, S. 388) wird dieser wie folgt abgegrenzt:

- Zwischen Kernstadt und Agglomerationsgemeinde soll grundsätzlich ein baulicher Zusammenhang bestehen
- Mindestens ein Drittel der Berufstätigen ist in der Kernstadt oder einer anderen Agglomerationsgemeinde tätig
- Die landwirtschaftliche Bevölkerung erreicht höchstens 20 % der Gemeindebevölkerung

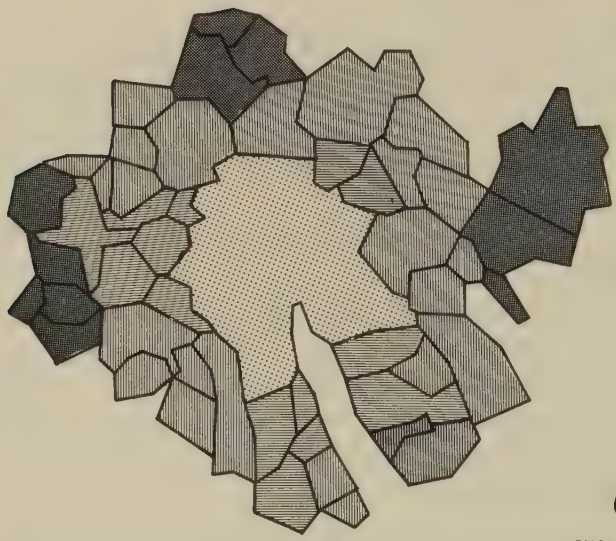
Werden diese Kriterien auf die Daten der Volkszählung 1970 angewendet, so erhalten wir die Agglomeration Zürich 1970, für die in Tabelle 1.3 die Bevölkerungsentwicklung dargestellt ist.

Tabelle 1.3: Bevölkerungsentwicklung für Stadt und Agglomeration Zürich 1970 zwischen 1930 und 1975

	1930	1941	1950	1960	1970	1975*
Stadt Zürich	291	336	390	440	423	390
Agglomeration Zürich 1970	381	434	509	627	719	713
Verhältnis Stadt zu Agglomeration Zürich 1970	76 %	76 %	77 %	70 %	59 %	55 %

Quellen: JbSZ (1976), JbCH (1977)
* am Jahresende

Abbildung 1.3: Die Entwicklung der Agglomeration Zürich



STADT ZÜRICH

AGGLOMERATIONS-GEMEINDEN 1950

ADLISWIL
DIETIKON
KILCHBERG
KÜSNACHT
LANGNAU A.A.
OBERENGSTRINGEN
OPFIKON
RÜSCHLIKON
SCHLIEREN
UITIKON
UNTERENGSTRINGEN
URDORF
WALLISELLEN
ZOLLIKON

ZUWACHS AGGLOMERATIONS-GEMEINDEN 1960

AESCH
BASSERSDORF
BIRMENSDORF
BONSTETTEN
BUCHS
DÄLLIKON
DIETLIKON
DÜBENDORF
ERLENBACH
FÄLLANDEN
GEROLDSWIL
HERRLIBERG
KLOTEN
MAUR
OBERRIEDEN
OETWIL A.D.L.
REGENSDORF
RÜMLANG
SCHWERZENBACH
STALLIKON
THALWIL
WANGEN
WEININGEN
WETTSWIL
ZUMIKON

ZUWACHS AGGLOMERATIONS-GEMEINDEN 1970

BERGDIETIKON AG
BERIKON AG
GREIFENSEE
ILLNAU
NIEDERGLATT
NIEDERHASLI
OBERGLATT
RUDOLFSTETTEN AG
SPREITENBACH AG
VOLKETSWIL
WIDEN AG

Quelle: JbSZ (1976, S. 388)

Bis ca. 1950 nahm die Bevölkerung in den Stadt- und Agglomerationsgemeinden etwa gleich stark zu. Zwischen 1950 und 1960 sank der Anteil der Stadt- an der Agglomerationsbevölkerung trotz weiterem Bevölkerungswachstum. Danach nahm die Einwohnerzahl der Kerngemeinde ab, während jene der Gürtelgemeinden weiterhin zunahm. Zwischen 1930 und 1975 reduzierte sich der Anteil der Stadtbevölkerung an der gesamten Agglomerationsbevölkerung von 76 % auf 55 %. In Abbildung 1.3 ist die Entwicklung der Agglomeration seit 1950 dargestellt.

Die für Zürich dargestellte Entwicklung zwischen Kern- und Gürtelgemeinden ist auch in den grossstädtischen Agglomerationen von Basel, Genf und Bern, in abgeschwächtem Ausmass auch für Lausanne, gültig: Bei kleinem Geburtenüberschuss nahmen die Einwohnerzahlen wegen der Wanderungsverluste ab, während die Gürtelgemeinden hohe Geburten- und Wanderungsüberschüsse zu verzeichnen hatten. Aus Tabelle 1.4 ist dieser Prozess für den Zeitraum 1960 - 1970 ersichtlich.

Tabelle 1.4: Relative Bevölkerungsentwicklung in den Kern- und Gürtelgemeinden der 5 grossstädtischen Agglomerationen zwischen 1960 und 1970

1960 - 1970 Agglomeration	Bevölkerungszuwachs in der Kerngemeinde in %		Bevölkerungszuwachs in d.Gürtelgemeinde in %	
	Geburten-überschuss	Wanderungs-überschuss	Geburten-überschuss	Wanderungs-überschuss
Zürich	2,4	- 6,4	20,7	35,6
Basel	3,5	- 0,5	15,3	26,8
Genève	2,1	- 3,5	16,6	81,3
Bern	3,1	- 3,6	17,0	27,6
Lausanne	3,5	5,3	14,4	47,5
5 grossstädt. Agglomerationen	2,8	- 3,1	17,6	40,1

Quelle: Bürcher (1976)

Betrachten wir die Entwicklung der Arbeitsplätze in den fünf grossstädtischen Agglomerationen, so ist eine gegensätzliche Entwicklung festzustellen. Wie Tabelle 1.5 zeigt, liegt der Beschäftigtenanteil durchwegs über dem Bevölkerungsanteil, mit Schwergewicht auf dem tertiären Sektor.

Tabelle 1.5: Bevölkerungs- und Beschäftigtenanteil des Kerns am Agglomerationstotal

Grossstädtische Agglomerationen	Anteile des Kerns am Agglomerationstotal in Prozenten 1970		
	Bevölkerung	Beschäftigte insgesamt	Beschäftigte 3. Sektor
Zürich	59	74	79
Basel	56	74	81
Genève	54	72	75
Bern	57	78	85
Lausanne	61	72	82

Quelle: Bürcher (1976)

In Tabelle 1.6 ist die Anzahl der Pendler in die Kerngemeinden Zürich, Basel, Bern und Genf für die Jahre 1950, 1960 und 1970 aufgeführt. Die Zahlen bestätigen die oben gemachten Aussagen und lassen darauf schliessen, dass die seit 1960 in den Kerngemeinden neu geschaffenen Arbeitsplätze praktisch vollständig durch Pendler besetzt werden mussten.

Tabelle 1.6: Anzahl der Pendler und deren Anteil an den Berufstätigen der Kerngemeinden für den Zeitraum 1950 bis 1970

Stadt	Anzahl Pendler (in '000)			Anteil Pendler an den Berufstätigen (in %)		
	1950	1960	1970	1950	1960	1970
Zürich	27,0	50,6	92,3	11,0	18,7	30,5
Bern	16,3	25,7	42,5	15,5	20,3	29,4
Basel	13,7	21,9	40,1	16,4	22,1	34,0
Genf	10,7	18,9	40,2	12,4	17,6	33,1

Quellen: Esta (383), Esta (549)

14. Problemstellung und Vorgehen

Fassen wir die bisherigen Ausführungen zusammen, so ergeben sich folgende, für unsere weitere Arbeit wesentliche Tatbestände:

- Falls nicht einschneidende exogene Einflüsse die bisherige Entwicklung beeinflussen, ist mit einer weiteren Zunahme der Motorisierung zu rechnen.
- In grossstädtischen Agglomerationen sind zwei gegensätzliche Trends zu beobachten. Einerseits nimmt die Wohnbevölkerung ab, anderseits ist mit einer zunehmenden Konzentration der Arbeitsplätze in der Kerngemeinde zu rechnen, insbesondere durch solche des Dienstleistungssektors.

Das Zusammenwirken dieser Faktoren führt zu Verkehrsmengen, welche räumlich - längs der Entwicklungsachsen der Agglomeration - und zeitlich - vor Arbeitsbeginn und nach Arbeitsschluss - eine Nachfrage nach Verkehrsraum auslösen, der ein nur in bestimmten Grenzen erweiterbares Angebot gegenübersteht. Die Auswirkungen dieses Nachfrageüberhanges sind bekannt; im Innenstadtbereich sind die Reisegeschwindigkeiten teilweise unter das Schrittempo gesunken, und bei ausserordentlichen Ereignissen (z.B. schlechter Witterung) kommt es zu eigentlichen Verkehrszusammenbrüchen.

Wenn wir von der Voraussetzung ausgehen, dass die Nachfrage nach Verkehrsleistungen, welche zur Beanspruchung von Verkehrsflächen für den fliessenden und ruhenden Verkehr führt, nicht direkt beeinflusst werden kann oder soll, so ist in der Zukunft mit einer Verschärfung der Stauungsprobleme im Agglomerationsbereich zu rechnen. Eine Erhöhung der technischen Kapazität, d.h. ein Ausbau der Infrastruktur, drängt sich dann in all jenen Fällen auf, wo die bestehenden Anlagen die anfallende Verkehrsmenge nicht mehr aufnehmen können. Diese bisher praktizierte Politik, welche trotz intensiven Bemühungen die

Angebotslücke nicht zu schliessen vermochte, stösst je länger desto mehr an Grenzen: Investitionen in Verkehrsanlagen sind nur durch massive Eingriffe in das Stadtgefüge realisierbar, die von der Bevölkerung nicht mehr ohne weiteres akzeptiert werden; sie erfordern grosse finanzielle Mittel, die von den öffentlichen Haushalten nicht mehr aufgebracht werden können; sie sind langfristig unwirksam, weil das verbesserte Angebot an Verkehrsraum (zumindest bisher) in kurzer Zeit zu Nutzungsänderungen im erschlossenen Gebiet führt, welche wiederum zu einer Ausweitung der Nachfrage Anlass geben.

Werden Abstriche an der freien Verkehrsmittelwahl gemacht, so kann die Kapazität eines Verkehrsträgers auch durch den Einsatz leistungsfähigerer Verkehrsmittel vergrössert werden, ohne die Infrastruktur ausbauen zu müssen. Dieser Frage wollen wir in dieser Arbeit nachgehen, wobei wir eine Reihe vereinfachender Annahmen treffen, um die realen Bedingungen modellmässig abbilden zu können. Die Modellstadt, die wir unseren Betrachtungen zugrunde legen, besteht aus einer City, in der sich die überwiegende Anzahl der Arbeitsplätze befindet. Die City wird durch Korridore erschlossen, welche den Verkehr in den Agglomerationsgemeinden sammeln und durch das die City umgebene Stadtgebiet führen. Aus diesem Korridor schneiden wir jenes Stück heraus, längs dem eine konstante Nachfrage besteht, d.h. wo die Verkehrsleistung annähernd konstant ist. Auf dieser Annahme aufbauend, wird im folgenden Abschnitt versucht, eine Produktionsfunktion für Verkehrsleistungen abzuleiten, wenn zwei Verkehrsmittel unterschiedlicher Leistungsfähigkeit eingesetzt werden: Personenwagen und Bus. Anschliessend werden die Kosten untersucht, die in Abhängigkeit der Verkehrsteilung anfallen, wobei auch die externen Effekte in die Betrachtung einbezogen werden sollen. Auf diesen Grundlagen aufbauend wird versucht, den Expansionspfad zu bestimmen, wenn die Verkehrsleistung variiert wird. An einem Beispiel werden die Einflüsse der wichtigsten Parameter aufgezeigt und anschliessend mögliche verkehrspolitische Massnahmen diskutiert.

2. Grundlagen

21. Verkehrstechnische Grundlagen

211. Der Verkehrsablauf

Die Reisegeschwindigkeit eines Verkehrsmittels, definiert als Verhältnis von Reiselänge und dazu erforderlicher Fahrzeit inklusive unfreiwillige Halte, ist von verschiedenen, sich gegenseitig beeinflussenden Faktoren abhängig. Diese können in drei Hauptgruppen gegliedert werden:

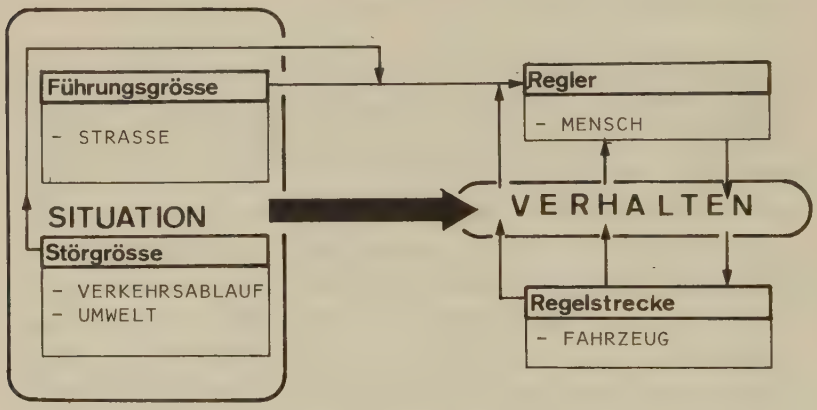
- Verkehrsträger: Zu den massgebenden Einflussgrössen des Verkehrsträgers zählen Anzahl und Breite der Fahrstreifen, die horizontale und vertikale Linienführung, die seitliche Hindernisfreiheit, die Anzahl Kreuzungen pro Längeneinheit, die Art der Verkehrslenkung sowie die Höchstgeschwindigkeit.

- Verkehrsmittel: Neben den geometrischen Abmessungen sind insbesondere jene Faktoren bedeutsam, die sich auf das Leistungsvermögen auswirken (Beschleunigungsverhalten, erreichbare Geschwindigkeit). Massgebend ist aber auch die Zusammensetzung der Verkehrsmenge, d.h. der Anteil der einzelnen Fahrzeugarten am Gesamtverkehr.

- Umwelt: Unter diesem Begriff werden z.B. die Witterungs- und Lichtverhältnisse sowie die Sichtbedingungen zusammengefasst.

Nach Dietrich (1977, S. III.3) kann der Zusammenhang zwischen diesen Faktoren vereinfachend durch den in Abbildung 2.1 skizzierten Regelkreis dargestellt werden.

Abbildung 2.1: Wichtigste Beziehungen zwischen den Faktoren Mensch, Strasse, Fahrzeug und Umwelt



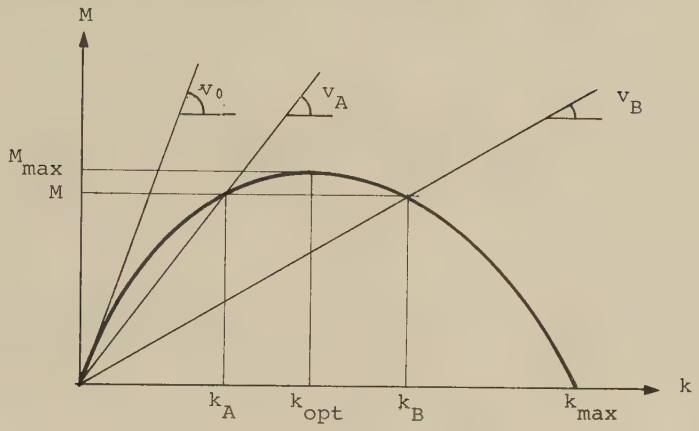
Quelle: Dietrich (1977)

Der Verkehrsträger Strasse ist die geometrische Führungsgrösse für die Fortbewegung des Fahrzeugs. Die Umweltbedingungen und der von den übrigen Verkehrsteilnehmern mitbestimmte Verkehrsablauf werden zusammen mit der Führungsgrösse vom einzelnen Fahrer als Situation wahrgenommen und beeinflussen sein Verhalten. Dieses wiederum kann als Resultante von Aktionen des Fahrers (z.B. Beschleunigen durch Drücken des Gaspedals) und Reaktion der Regelstrecke (z.B. Beschleunigungsvermögen des Fahrzeugs) interpretiert werden.

212. Das Fundamentaldiagramm

Als Fundamentaldiagramm wird nach Leutzbach (1972, S. 96) die graphische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Verkehrsmenge M {Fz/h} und Verkehrsdichte k {Fz/km} gemäss Abbildung 2.2 bezeichnet.

Abbildung 2.2: Fundamentaldiagramm



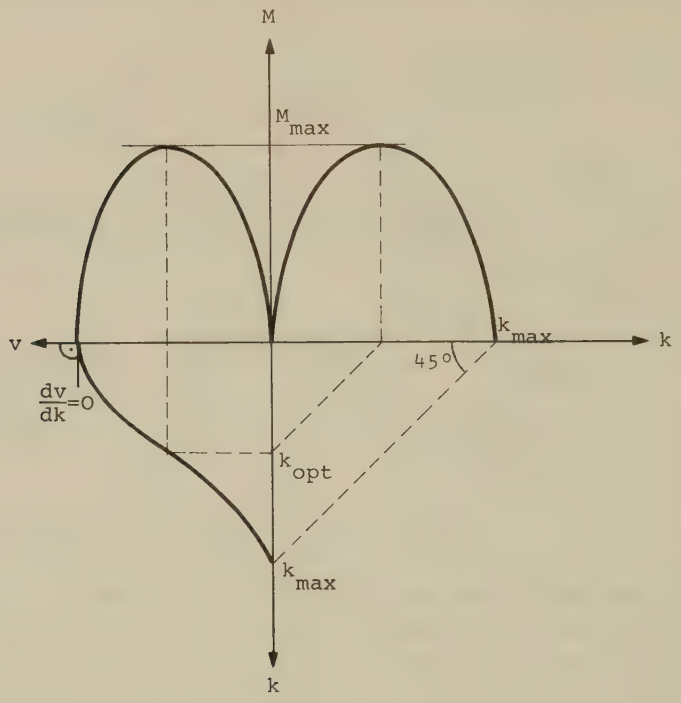
Quelle: Leutzbach (1972)

Die pro Zeiteinheit einen festen Strassenquerschnitt überschreitende Verkehrsmenge M tritt in der Regel bei zwei unterschiedlichen Dichten k_A und k_B auf, denen unterschiedliche Geschwindigkeiten

$$v_A = \frac{M}{k_A} , \qquad v_B = \frac{M}{k_B} \tag{2.1}$$

entsprechen. Für die beiden Extremwerte der Verkehrsdichte, $k = 0$ und $k = k_{max}$, verschwindet die Verkehrsmenge. Dazwischen erreicht sie bei k_{opt} ein Maximum. Aus Gleichung 2.1 bzw. Abbildung 2.2 lassen sich auch die Geschwindigkeits - Dichte und Verkehrsmengen - Geschwindigkeits Diagramme ableiten, wie dies in Abbildung 2.3 für den Punkt (k_{opt}, M_{max}) gestrichelt angedeutet ist.

Abbildung 2.3: Zusammenhang zwischen Verkehrsmenge M, Verkehrsdichte k und Reisegeschwindigkeit v



Quelle: Leutzbach (1972)

Ein eindeutiger Zusammenhang besteht nur zwischen Verkehrsdichte k und Reisegeschwindigkeit v. Im Verkehrsmengen - Dichte Koordinatensystem kann zwar jeder Verkehrsdichte eine (und nur eine) Verkehrsmenge zugeordnet werden, hingegen entsprechen jeder Verkehrsmenge zwei Dichten (bzw. Geschwindigkeiten).

Abbildung 2.3 gibt auch die Randbedingungen wieder, die das Fundamentaldiagramm erfüllen muss:

- Für $k \to 0$ muss auch $M \to 0$ (2.2)
  Geht die Verkehrsdichte gegen Null, so muss auch die Verkehrsmenge verschwinden.

- Für $k \to k_{max}$ muss $M \to 0$ (2.3)
  Bei maximaler Verkehrsdichte, die in einer stehenden Fahrzeugkolonne erreicht wird, muss die Verkehrsmenge ebenfalls Null sein.

- Für $k \to 0$ gilt $\frac{dv}{dk} = 0$ oder $\frac{dM}{dk} = v_0$ (2.4)
  Bei freiem, unbehindertem Verkehrsablauf ist die Geschwindigkeit unabhängig von der Verkehrsdichte.

- Für $k \to 0$ gilt $v = v_0$ (2.5)
  Bei kleinen Verkehrsdichten ist die Geschwindigkeit abhängig von den im Abschnitt 211 aufgeführten Faktoren, jedoch unabhängig von der Verkehrsdichte.

Die Leistungsfähigkeit des Verkehrsträgers wird mit M_{max} bezeichnet. Sie ist definiert als grösste Anzahl Fahrzeuge, die in geschlossener Kolonne einen Querschnitt bei gegebenen Bedingungen in einer Stunde durchfahren kann (Dietrich (1975, S. 45)).

213. Die Produktionsfunktion

Um die Produktionsfunktion herleiten und diskutieren zu können, gehen wir von der Verkehrsleistung aus. Wir definieren sie als Anzahl Personenkilometer pro Zeiteinheit, die auf einem Verkehrsträger gegebener Länge durch Einsatz verschiedener Verkehrsmittel erbracht wird.

In Anlehnung an die Produktionstheorie können die Verkehrsmittel als Produktionsfaktoren, die Verkehrsleistung als Output interpretiert werden, der nach Henderson (1973, S. 48) als maximale Produktionsmenge bei gegebenem Faktoreinsatz definiert ist.

Bei der Herleitung der Produktionsfunktion gehen wir schrittweise vor. Vorerst beschränken wir uns auf den Individualverkehr, leiten in einem zweiten Schritt die Produktionsfunktion unter der Annahme ab, dass nur öffentliche Verkehrsmittel eingesetzt werden und kombinieren schliesslich die beiden Ansätze.

2131. Produktionsfunktion für Verkehrsmittel ohne Fahrtunterbruch

Befinden sich y_1 gleiche (homogene) individuelle Verkehrsmittel auf einem Verkehrsträger der Länge L, und bewegen sich die Fahrzeuge mit der Geschwindigkeit v_1, dann ist die pro Zeiteinheit erbrachte Verkehrsleistung gegeben durch

$$V_p = y_1 v_1 b_1 \qquad (2.7a)$$

V_p = Verkehrsleistung für Verkehrsmittel ohne Fahrtunterbruch ≡ private Verkehrsleistung {Pers.km/h}

y_1 = Anzahl Fahrzeuge {Fz}

v_1 = Reisegeschwindigkeit {km/h}

b_1 = Besetzungsgrad {Pers./Fz}

$$k_1 = y_1/L \qquad (2.7b)$$

k_1 = Verkehrsdichte {Fz/km}

Zwischen Verkehrsdichte und Reisegeschwindigkeit kann folgende Beziehung aufgestellt werden:

$$v_1 = v_0 \, e^{-(k_1/c)^2} \qquad (2.8)$$

Dieser Ansatz erfüllt die Bedingungen 2.2 bis 2.5 mit einer Ausnahme:

$$M_1 \neq 0 \text{ für } k_1 = k_{max}$$

Wie wir sehen werden, ist die Verletzung der Bedingung 2.3 für unsere Arbeit nicht relevant. Für die in Wirklichkeit auftretenden maximalen Verkehrsdichten k_{max} von 140 bis 150 Fahrzeugen pro Kilometer ist die Abweichung vom theoretischen Wert unbedeutend. Die Konstante c in Gleichung 2.8 hat die gleiche Dimension wie k, der Exponent ist somit dimensionslos.

Die Verkehrsleistung ergibt sich zu

$$V_p = y_1 v_0 \, e^{-(k_1/c)^2} \, b_1$$

und ist maximal, wenn

$$\frac{dV_p}{dy_1} = v_1 (1 - \frac{2y_1^2}{L^2 c^2}) b_1 = 0 \qquad (2.9)$$

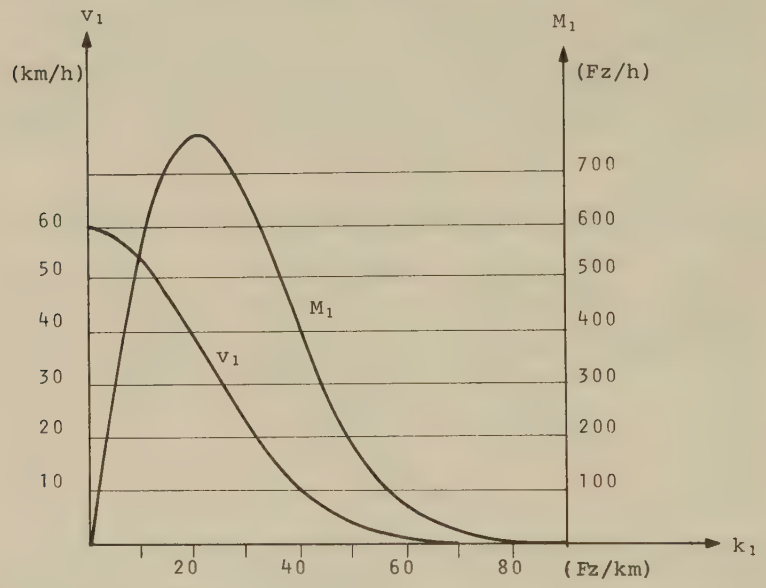
$$\text{d.h.} \quad \frac{y_1}{L} = \frac{\sqrt{2}}{2} \, c \quad \text{ist.} \qquad (2.10)$$

Die linke Seite der Gleichung 2.9 ist identisch mit der Grenzproduktivität des Faktors y_1. Da sich die Verkehrsmenge $M_1 = k_1 y_1$ von der Verkehrsleistung V_p nur durch die konstanten Grössen b_1 und L unterscheidet, ist Gleichung 2.10 auch die notwendige Bedingung für die Leistungsfähigkeit. Sie beträgt

$$M_{1\,max} = \frac{\sqrt{2}}{2} \, c \, v_0 \, e^{-1/2} \qquad (2.11)$$

Für v_0 = 60 km/h und c = 30 Fz/km sind der Geschwindigkeits- und Verkehrsmengenverlauf in Abhängigkeit von k_1 in Abbildung 2.4 dargestellt.

Abbildung 2.4: Geschwindigkeits- und Verkehrsmengenverlauf als Funktion der Verkehrsdichte



2132. Produktionsfunktion für Verkehrsmittel mit Fahrtunterbruch

Im Gegensatz zu den in Abschnitt 2131 behandelten Verkehrsmitteln müssen die öffentlichen Verkehrsmittel zur Bedienung der Haltestellen ihre Fahrt unterbrechen. Dadurch nehmen Reisegeschwindigkeit und Verkehrsleistung ebenfalls ab. Die Verkehrsleistung $V_{ö}$ des öffentlichen Verkehrsmittels ist gegeben durch:

$$V_{ö} = y_2 v_2 b_2 \qquad (2.12)$$

y_2 = Anzahl öffentliche Verkehrsmittel {Fz}

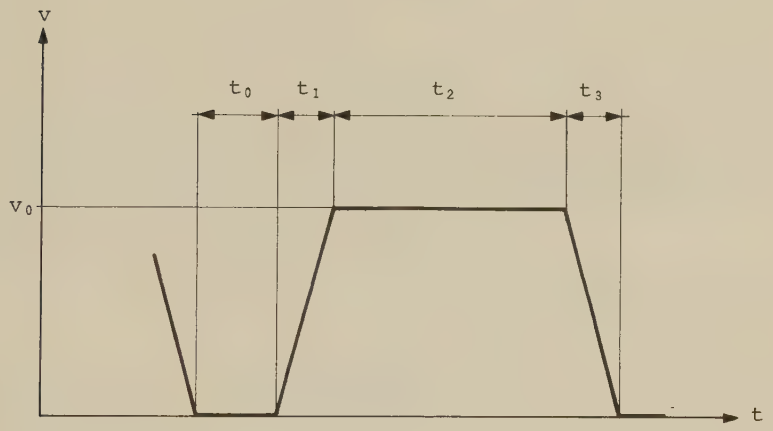
v_2 = Reisegeschwindigkeit {km/h}

b_2 = Besetzungsgrad {Pers./Fz}

Befinden sich im betrachteten Korridor nur öffentliche Verkehrsmittel, dann kann angenommen werden, dass die Reisegeschwindigkeit v_2 von y_2 unabhängig ist und sich als Quotient

von Haltestellenabstand und gesamter Fahrzeit berechnen lässt. Das Geschwindigkeits - Zeit Diagramm ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

Abbildung 2.5: Ausschnitt aus dem Geschwindigkeits - Zeit Diagramm für das öffentliche Verkehrsmittel



Die gesamte Fahrzeit zwischen zwei Haltestellen ist gegeben durch

$$t = t_0 + t_1 + t_2 + t_3 \qquad (2.13)$$

t_0 = Haltestellenaufenthaltszeit
t_1 = Beschleunigungszeit
t_2 = Fahrzeit mit Geschwindigkeit v_0
t_3 = Verzögerungszeit

Ist die Beschleunigung a konstant und absolut gleich der Verzögerung, so gilt

$$t_1 = t_3 = \frac{v_0}{|a|} \qquad (2.14)$$

Der Haltestellenabstand l ergibt sich als Integral der Geschwindigkeit während der Fahrzeit t. Nach Abbildung 2.5 gilt:

$$l = 2\, v_0 \frac{t_1}{2} + v_0 t_2 \qquad (2.15)$$

Kombiniert mit Gleichung 2.14 erhalten wir

$$t_2 = \frac{al - v_0^2}{av_0} \qquad (2.16)$$

$$v_2 = v_0 \frac{al}{al + av_0 t_0 + v_0^2} \qquad (2.17)$$

Die Bedingung $t_2 > 0$ gibt den Gültigkeitsbereich von 2.16 an:

$$l > \frac{v_0^2}{a} \quad \text{bzw.} \quad v_0 < \sqrt{al} \qquad (2.18)$$

Die Verkehrsleistung ist gegeben durch

$$V_{ö} = y_2 v_0 \frac{al}{al + av_0 t_0 + v_0^2} b_2 \qquad (2.19)$$

2133. Produktionsfunktion für beide Verkehrsmittel

Verkehren auf demselben Fahrstreifen beide Verkehrsmittelarten, also solche mit und solche ohne Fahrtunterbruch, so ergibt sich die gesamte Verkehrsleistung als Summe von V_p und $V_{ö}$.

Allerdings ist zu beachten, dass die Geschwindigkeiten v_1 und v_2 nicht mehr mit den Gleichungen 2.8 und 2.17 bestimmt werden können, weil die Verkehrsdichte sowohl von y_1 als auch von y_2 abhängig ist. Hinzu kommt, dass die beiden Verkehrsmittel unterschiedliche statische (z.B. Länge) und dynamische (z.B. Beschleunigungsvermögen) Eigenschaften aufweisen.

Das Problem ungleicher Fahrzeugmerkmale kann überwunden werden, indem die Verkehrsmittel gewichtet werden. Diese als Fahrzeugäquivalente f_i bezeichneten Grössen sind dimensionslos und geben an, wie vielen Personenwageneinheiten (PWE) ein Fahrzeug entspricht.

Die Dichte k_1 in Gleichung 2.7b geht somit über in $k_1 = y_1 f_1 / L$. Sind y_1 Personenwagen, so ändert sich gegenüber Gleichung 2.7b allerdings nichts, da $f_1 = 1$ ist.

Die Verkehrsdichte k_2 kann folgendermassen ermittelt werden. Von den y_2 Fahrzeugen, die sich im Korridor befinden, halten sich im Durchschnitt $y_2 \frac{t_0}{t}$ Fahrzeuge in der Haltebucht auf. Der für die Reisegeschwindigkeit massgebende Dichtebeitrag des Verkehrsmittels 2 lautet somit

$$k_2 = y_2 \frac{f_2}{L} (1 - \frac{t_0}{t}) = \frac{y_2 f_2}{L} \frac{t_1+t_2+t_3}{t}$$

$$= y_2 \frac{f_2}{L} \frac{al+v_1^2}{al+av_1t_0+v_1^2} \qquad (2.20)$$

In Gleichung 2.20 ist v_1 die Reisegeschwindigkeit des Verkehrsmittels 1 und ersetzt die in den Gleichungen 2.14 bis 2.19 verwendete Maximalgeschwindigkeit v_0. Wir nehmen also an, dass das Verkehrsmittel 2 nach Verlassen der Haltestelle bis auf die Geschwindigkeit v_1 beschleunigt. Diese hält es dann bis zum nächsten Haltestellenmanöver ein. Die zur Berechnung der Geschwindigkeit v_1 massgebende Verkehrsdichte ist also

$$k_{12} = k_1 + k_2 = \frac{y_1}{L} f_1 + \frac{y_2}{L} f_2 \frac{al+v_1^2}{al+av_1t_0+v_1^2} \qquad (2.21)$$

Normieren wir k_{12} wiederum mit der Konstanten c, so kann die Reisegeschwindigkeit weiterhin aus Gleichung 2.8 berechnet werden, wenn statt k_1 das jetzt massgebende k_{12} eingesetzt wird. Mit $k \equiv k_{12}/c$ erhalten wir

$$v_1 = v_0 e^{-k^2} = v_0 e^{-\{\frac{y_1 f_1}{cL} + \frac{y_2 f_2}{cL} (\frac{al+v_1^2}{al+av_1t_0+v_1^2})\}^2} \qquad (2.22)$$

Die Gesamtverkehrsleistung ist jetzt gegeben als Summe der Verkehrsleistungen der beiden Verkehrsmittel

$$V = y_1 v_1 b_1 + y_2 v_2 b_2 \tag{2.23}$$

wobei $$v_2 = v_1 \frac{al}{al + a v_1 t_0 + v_1^2} \tag{2.24}$$

Bevor wir im nächsten Abschnitt die Eigenschaften der Produktionsfunktion eingehender behandeln, wollen wir die wichtigsten Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Variablen klarstellen. Gehen wir von den unabhängigen Variablen y_1 und y_2 aus, so ist v_1 eine implizite Funktion von y_1, y_2, v_1:

$$v_1 = v_1\{k[y_1, y_2, v_1(k)]\} \tag{2.22a}$$

Die Reisegeschwindigkeit des öffentlichen Verkehrsmittels ist

$$v_2 = v_2\{k[y_1, y_2, v_1(k)]\}, \tag{2.24a}$$

wobei der Ausdruck $al/(al + a v_1 t_0 + v_1^2)$ in Gleichung 2.24 den Faktor darstellt, um den die Geschwindigkeit v_1 zu reduzieren ist, um die Reisegeschwindigkeit des öffentlichen Verkehrsmittels in Abhängigkeit von Haltestellenaufenthaltszeit, Haltestellenabstand und Beschleunigungsvermögen zu berechnen. Für die Verkehrsleistung V ergibt sich:

$$V = V\{y_1, y_2, v_1[k(y_1, y_2, v_1(k))], v_2(v_1)\} \tag{2.23a}$$

Werden die Dichteänderungen vernachlässigt, d.h. wird für die Berechnung der Verkehrsdichte angenommen, dass sich alle Busse auf dem Fahrstreifen (d.h. keine in der Haltebucht) aufhalten, so ist $k_2 = y_2 f_2 / L$, und es gilt:

$$k = k(y_1, y_2) \tag{2.21b}$$

$$v_1 = v_1(k) = v_1(y_1, y_2) \tag{2.22b}$$

$$v_2 = v_2(v_1) = v_2[v_1(y_1, y_2)] \tag{2.24b}$$

und $$V = V\{y_1, y_2, v_1(k), v_2(v_1)\} \tag{2.23b}$$

214. Diskussion der Produktionsfunktion

Gleichung 2.23 stellt die Produktionsfunktion für Verkehrsleistungen dar, wenn beide Verkehrsmittel gleichzeitig eingesetzt werden. Wir wollen für die Diskussion der Eigenschaften der Produktionsfunktion annehmen, dass die Faktoren y_1 und y_2 beliebig teilbar und somit kontinuierlich gegeneinander substituierbar sind.

Die Isoquanten als Kurven konstanter Verkehrsleistung sind durch folgende Gleichungen bestimmt:

$$F \equiv -k + \frac{y_1 f_1}{cL} + \frac{y_2 f_2}{cL}\left(\frac{al+v_1^2}{al+av_1t_0+v_1^2}\right) = 0 \qquad (2.25)$$

$$V = v_1\left(y_1 b_1 + y_2 b_2 \frac{al}{al+av_1t_0+v_1^2}\right) = \text{konstant} \qquad (2.26)$$

$$v_1 = v_0\, e^{-k^2} \qquad (2.27)$$

Bezeichnen wir die partiellen Ableitungen nach y_1, y_2, k mit den Indices 1, 2 und k, so sind die totalen Differentiale der Gleichungen 2.25 und 2.26 gegeben durch

$$dF = F_1 dy_1 + F_2 dy_2 + F_k dk = 0 \qquad (2.28)$$

$$dV = V_1 dy_1 + V_2 dy_2 + V_k dk = 0 \qquad (2.29)$$

Die technische Substitutionsrate dy_2/dy_1 kann aus den Gleichungen 2.28 und 2.29 berechnet werden, indem dk eliminiert wird. Man erhält

$$G \equiv \frac{dy_2}{dy_1} = -\frac{F_1V_k - V_1F_k}{F_2V_k - V_2F_k} \qquad (2.30)$$

$$\text{Mit} \quad A \equiv al + av_1t_0 + v_1^2 \qquad (2.31)$$

$$V_1 = v_1 b_1 \tag{2.32}$$

$$V_2 = v_1 b_2 \frac{al}{A} \tag{2.33}$$

$$V_k = -2kv_1\{y_1 b_1 + y_2 b_2 \frac{al}{A^2}(al-v_1^2)\} \tag{2.34}$$

$$F_1 = \frac{f_1}{cL} \tag{2.35}$$

$$F_2 = \frac{f_2}{cL}\,\frac{al+v_1^2}{A} \tag{2.36}$$

und

$$F_k = -1 + 2k\,\frac{y_2 f_2}{cL}\,\frac{av_1 t_0}{A^2}\,(al-v_1^2) \tag{2.37}$$

ergibt sich durch Einsetzen in 2.30 nach einigen Umformungen

$$\frac{dy_2}{dy_1} = -\frac{2kb_1\frac{y_1 f_1}{cL} + \frac{2k}{A^2}(al-v_1^2)\left(\frac{f_1 b_2 al}{f_2}+av_1 t_0 b_1\right)\frac{y_2 f_2}{cL} - b_1}{2kb_1\frac{f_2}{f_1}\,\frac{(al+v_1^2)}{A}\,\frac{y_1 f_1}{cL} + 2k\frac{b_2 al}{A^2}(al-v_1^2)\frac{y_2 f_2}{cL} - \frac{b_2 al}{A}} \tag{2.38}$$

Für $k \to 0$ gilt $v_1 \to v_0$, d.h. A geht in eine Konstante über. Da die multiplikative Verknüpfung zwischen y_1, y_2 und k in Gleichung 2.38 zu Grössen zweiter Ordnung führt, kann man schliessen, dass für kleine k die Isoquanten näherungsweise als Geraden mit der Steigung

$$\lim_{k\to 0} \frac{dy_2}{dy_1} = -\frac{b_1 A}{b_2 al} \tag{2.39}$$

dargestellt werden können.

Wir wollen zeigen, unter welchen Bedingungen die Isoquanten streng konvex sind. Dabei beschränken wir uns auf den Fall, der durch die Gleichungen 2.21b bis 2.23b beschrieben wird, d.h. unter der Annahme, dass sich alle Busse auf dem Fahrstreifen befinden.

Die Gleichung 2.25 geht dann über in

$$F = -k + \frac{y_1 f_1}{cL} + \frac{y_2 f_2}{cL} = 0 \tag{2.40}$$

Während F_1 weiterhin durch Gleichung 2.35 gegeben ist, lauten die übrigen Ableitungen

$$F_2 = \frac{f_2}{cL} \tag{2.41}$$

$$F_k = -1 \tag{2.42}$$

Die Krümmung der Isoquanten erhalten wir, wenn wir Gleichung 2.30 nach y_1 ableiten. Bezeichnen wir den Ausdruck auf der rechten Seite mit G, so ist die Krümmung bestimmt durch

$$\frac{d^2 y_2}{dy_1^2} = \frac{dG}{dy_1} = G_1 + G_2 \frac{dy_2}{dy_1} + G_k \frac{dk}{dy_1} \tag{2.43}$$

Der Quotient $\frac{dk}{dy_1}$ kann wiederum aus den Gleichungen 2.28 und 2.29 ermittelt werden.

Berücksichtigen wir, dass die Ableitungen

$$F_{ij} = 0; \quad \text{für i und j} = 1, 2, k \tag{2.44}$$

und

$$V_{ij} = 0; \quad \text{für i und j} = 1, 2 \tag{2.45}$$

sind, so ergeben sich die Ausdrücke in Gleichung 2.43 zu

$$G_1 = F_k V_{1k} \frac{(F_1 V_2 - V_1 F_2)}{(V_2 F_k - F_2 V_K)^2} \tag{2.46}$$

$$G_2 = \frac{F_k V_{2k} (F_1 V_2 - V_1 F_2)}{(V_2 F_k - F_2 V_k)^2} \tag{2.47}$$

$$G_k = \frac{F_k V_{1k}(F_2V_k - V_2F_k) + F_k V_{2k}(V_1F_k - F_1V_k) + F_k V_{kk}(F_1V_2 - V_1F_2)}{(V_2F_k - F_2V_k)^2} \tag{2.48}$$

$$\frac{dy_2}{dy_1} \equiv G = \frac{F_1V_k - V_1F_k}{V_2F_k - F_2V_k} \tag{2.30}$$

$$\frac{dk}{dy_1} = \frac{F_1V_2 - V_1F_2}{F_2V_k - V_2F_k} \tag{2.49}$$

Setzen wir die Gleichungen 2.46 bis 2.49 in 2.43 ein, so erhalten wir folgende Bedingung für strenge Konvexität:

$$\frac{d^2y_2}{dy_1^2} = \frac{2F_k(F_1V_2 - V_1F_2)}{(F_2V_k - V_2F_k)^2} \cdot \left\{\frac{V_k(V_{1k}F_2 - V_{2k}F_1) + F_k(V_{2k}V_1 - V_{1k}V_2) + 0{,}5\, V_{kk}(F_1V_2 - V_1F_2)}{F_2V_k - V_2F_k}\right\}$$

$$> 0 \tag{2.50}$$

Mit $$V_{1k} = -2kv_1b_1 \tag{2.51}$$

$$V_{2k} = -2kv_1 \frac{al}{A^2} b_2(al - v_1^2) \tag{2.52}$$

$$V_{kk} = (4k^2v_1 - 2v_1)\{y_1b_1 + y_2b_2\frac{al}{A^2}(al - v_1^2)\} - \\ -8k^2v_1y_2b_2\frac{al}{A^2}\{v_1^2 + \frac{(al - v_1^2)}{A}(av_1t_0 + 2v_1^2)\} \tag{2.53}$$

und den Gleichungen 2.31 bis 2.35 sowie 2.41 und 2.42 erhalten wir für den Zähler vor der geschweiften Klammer:

$$F_k(F_1V_2 - V_1F_2) = -\frac{v_1}{cL}(f_1b_2\frac{al}{A} - b_1f_2) \tag{2.54}$$

Setzen wir voraus, dass dieser Ausdruck negativ ist, so lautet die erste Bedingung für strenge Konvexität

$$f_1 b_2 \frac{al}{A} > b_1 f_2 \qquad (2.55)$$

Der Nenner in der geschweiften Klammer lautet

$$-2kv_1 \frac{f_2}{cL} \{y_1 b_1 + y_2 b_2 \frac{al}{A^2}(al-v_1^2)\} + v_1 b_2 \frac{al}{A}$$

Setzen wir voraus, dass dieser Ausdruck positiv ist, dann können wir wegen

$$k \geq \frac{y_1 f_1}{cL} \quad \text{und} \quad k \geq \frac{y_2 f_2}{cL} \quad \text{auch schreiben}$$

$$b_2 \frac{al}{A} f_1 \{1 - \frac{2k^2}{A}(al-v_1^2)\} > 2k^2 b_1 f_2 \qquad (2.56)$$

Die dritte Bedingung verlangt, dass der Zähler in der geschweiften Klammer negativ wird. Einsetzen von 2.32 bis 2.35, 2.41, 2.42, 2.51 bis 2.53 in 2.50 ergibt

$$b_2 \frac{al}{A} f_1 \{\frac{al-v_1^2}{A} - \frac{1}{2} + \frac{4}{k^2}\} > b_1 f_2 \{\frac{1}{2} + \frac{4}{k^2}\} \qquad (2.57)$$

Für $k \to 0$ nehmen 2.55 und 2.56 endliche Werte an. Gleichung 2.57 als Zähler der Gleichung 2.50, welche die Krümmung der Isoquanten angibt, strebt aber wegen dem Glied $4/k^2$ gegen unendlich, d.h. die Isoquanten nähern sich Geraden.

Die Kammlinien $\frac{dy_2}{dy_1} = 0$ und $\frac{dy_1}{dy_2} = 0$ erfordern, dass der Zähler bzw. der Nenner der Gleichung 2.38 Null sind. Bleiben die Dichteänderungen unberücksichtigt, so erhalten wir

$$2k \frac{y_1 f_1}{cL} b_1 + 2k \frac{y_2 f_1}{cL} b_2 \frac{al}{A^2}(al-v_1^2) - b_1 = 0 \qquad (2.58)$$

und $$2k \frac{y_1 f_2}{cL} b_1 + 2k \frac{y_2 f_2}{cL} b_2 \frac{al}{A^2}(al-v_1^2) - \frac{b_2 al}{A} = 0 \qquad (2.59)$$

Die Verkehrsleistung für y_1 bei gegebenem y_2 ist auf der Kammlinie maximal. Die maximale Verkehrsleistung bei alleinigem Einsatz von y_1 erhalten wir also, wenn wir y_2 im Zähler von 2.38 oder von 2.58 Null setzen. Beide Gleichungen führen zu derselben Bedingung

$$\frac{y_1}{L} f_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} c \qquad (2.60)$$

Die Bedingung ist bis auf den Faktor f_1 identisch mit der Maximumbedingung in der Produktionsfunktion für y_1 allein (Gleichung (2.10).

Bei alleinigem Einsatz des Faktors y_2 existiert kein Verkehrsleistungsmaximum. Leitet man nämlich Gleichung 2.19 nach y_2 ab, so erhält man

$$\frac{\partial V_{\ddot{o}}}{\partial y_2} = v_0 b_2 \frac{al}{A} \neq 0$$

Der maximale Buseinsatz ist aus betrieblichen Randbedingungen abzuleiten. Man kann zeigen, dass kein absolutes Maximum existiert, bei dem beide Faktoren zum Einsatz kommen. Dieser Punkt wäre durch den Schnittpunkt der beiden Kammlinien gegeben. Die Rechnung ergibt aber keine positiven Werte für y_1.
Die Maximierung der Produktionsfunktion V (Gleichung 2.26) in bezug auf y_1 und y_2 und mit der Nebenbedingung F (Gleichung 2.25 bzw. 2.40) führt zum gleichen Ergebnis. Die Maximierung der entsprechenden Zielfunktion Z mit dem Lagrange Faktor λ

$$Z = V + \lambda F \qquad (2.62)$$

zeigt, dass reelle Lösungen nur existieren, wenn der Ausdruck

$$\frac{al(f_1 b_2 - f_2 b_1)}{f_2 b_1 v_0^2} < 1 \qquad (2.63)$$

ist, falls die Dichteänderungen berücksichtigt werden. Andernfalls lautet sie

$$\frac{al(f_1 b_2 - f_2 b_1)}{b_1 f_2 (a v_1 t_0 + v_1^2)} = 1 \qquad (2.64)$$

Die Substitutionselastizität, die das Verhältnis misst, zu dem die Substitution stattfindet, ist definiert als (Henderson (1973, S. 55)):

$$\sigma \equiv \frac{d\ \{\log(y_2/y_1)\}}{d\ \{\log\ (V_1^*/V_2^*\}} \tag{2.65}$$

und kann auch geschrieben werden als

$$\sigma = \frac{V_1^* V_2^* (V_1^* y_1 + V_2^* y_2)}{y_1 y_2 (2V_{12}^* V_1^* V_2^* - V_1^{*2} V_{22}^* - V_2^{*2} V_{11}^*)} \tag{2.66}$$

Ein * bezeichnet dabei totale Ableitung nach der indexierten Variablen. Werden die Dichteänderungen vernachlässigt, d.h. gilt Gleichung 2.40 , so erhalten wir folgende Beziehungen zwischen den totalen und den partiellen Ableitungen

$$V_1^* = V_k \frac{f_1}{cL} + V_1 \tag{2.67}$$

$$V_2^* = V_k \frac{f_2}{cL} + V_2 \tag{2.68}$$

$$V_{11}^* = V_{11} + 2V_{1k} \frac{f_1}{cL} + V_{kk} \left(\frac{f_1}{cL}\right)^2 \tag{2.69}$$

$$V_{12}^* = V_{12} + V_{1k} \frac{f_1}{cL} + V_{2k} \frac{f_2}{cL} + V_{kk} \frac{f_1 f_2}{(cL)^2} \tag{2.70}$$

$$V_{22}^* = V_{22} + 2V_{2k} \frac{f_2}{cL} + V_{kk} \left(\frac{f_2}{cL}\right)^2 \tag{2.71}$$

wobei die V_1, V_2, V_k usw. den Gleichungen 2.32 bis 2.34, 2.45 sowie 2.51 bis 2.53 entnommen werden können.

Die Substitutionselastizität ist positiv im Bereich, der durch die Bedingungen 2.55 bis 2.57 abgegrenzt wird, da die Isoquanten dort streng konvex sind.

Mit den Abkürzungen

$$A \equiv al + v_1^2 + av_1 t_0 \tag{2.31}$$

$$TE_1 \equiv av_1 t_0 + 2v_1^2 \tag{2.72}$$

$$TE_2 \equiv b_1 + 2k \frac{y_2 f_1}{cL} \frac{b_2 al}{A^2} TE_1 \tag{2.73}$$

$$TE_3 \equiv \frac{A + 2 \frac{y_2 f_2}{cL} k\, TE_1}{A^2} \tag{2.74}$$

$$TE_4 \equiv TE_1 + 2v_1^2 \tag{2.75}$$

$$TE_5 \equiv v_1 b_2 al \tag{2.76}$$

erhalten wir

$$V_1^* = -2k \frac{f_1}{cL} V + v_1\, TE_2 \tag{2.77}$$

$$V_2^* = -2k \frac{f_2}{cL} V + TE_3\, TE_5 \tag{2.78}$$

$$V_{11}^* = -2 \frac{f_1}{cL}\left(\frac{f_1}{cL} V + kV_1^*\right) - 2k\, v_1 \frac{f_1}{cL} TE_2 + 2y_2 \left(\frac{f_1}{cL}\right)^2 TE_5 \cdot \left(\frac{TE_1 - 2k^2 TE_4}{A^2} + \frac{4k^2 (TE_1)^2}{A^3}\right) \tag{2.79}$$

$$V_{12}^* = -2 \frac{f_2}{cL}\left(\frac{f_1}{cL} V + kV_1^*\right) - 2k \frac{f_1}{cL} TE_3\, TE_5 + 2 \frac{f_1}{cL} TE_5 \cdot \left\{\frac{\left(\frac{y_2 f_2}{cL} - k\right) TE_1 - 2k^2 \frac{y_2 f_2}{cL} TE_4}{A^2} + \frac{2k}{A} TE_1\, TE_3\right\} \tag{2.80}$$

$$V_{22}^* = -2 \frac{f_2}{cL}\left(\frac{f_2}{cL} V + kV_2^*\right) - 2k \frac{f_2}{cL} TE_3\, TE_5 + 2 \frac{f_2}{cL} TE_5 \cdot \left\{\frac{\frac{y_2 f_2}{cL} TE_1 - 2k^2 \frac{y_2 f_2}{cL} TE_4}{A^2} + \frac{2k}{A} TE_1\, TE_3\right\} \tag{2.81}$$

Ueber den Verlauf der Substitutionselastizität lassen sich wegen der komplizierten Ausdrücke keine allgemeingültigen Aussagen mehr machen. Daher wollen wir im nächsten Abschnitt die wichtigsten Eigenschaften der Produktionsfunktion an einem numerischen Beispiel aufzeigen.

215. Numerisches Beispiel

Für das Beispiel werden folgende Parameterwerte angenommen

$b_1 = 1{,}5$ Pers./PW $\quad f_1 = 1$ PWE/PW $\quad l = 300$ m
$b_2 = 60$ Pers./Bus $\quad f_2 = 3$ PWE/PW $\quad L = 5$ km
$c = 30$ Fz/km $\quad a = 1$ m/sec^2 $\quad v_0 = 60$ km/h $\quad t_0 = 20$ sec

Die Berechnung der Isoquanten ist nur auf iterativem Wege möglich. Deshalb wurden die wichtigsten Gleichungen programmiert und auf der Rechenanlage ausgewertet. Die wichtigsten Ergebnisse sind in den Tabellen 2.1 und 2.2 zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Faktorkombinationen und Verkehrsleistung bei Berücksichtigung der Dichteänderungen nach Gleichung 2.25

Dichteänderungen berücksichtigt: $k = \frac{y_1 f_1}{cL} + \frac{y_2 f_2}{cL} \frac{al+v_1^2}{al+av_1t_0+v_1^2}$										
V =	2000	4000	6000	8000	10000	12500	15000	17500	20000	25000
y_1	y_2 =	y_2 =	y_2 =	y_2 =	y_2 =	y_2 =	y_2 =	y_2 =	y_2 =	y_2 =
0	1.69	3.38	5.06	6.75	8.44	10.55	12.67	14.78	16.90	21.16
10	0.93	2.62	4.32	6.01	7.71	9.83	11.95	14.09	16.23	20.54
20	0.20	1.90	3.60	5.30	7.01	9.14	11.29	13.45	15.62	20.00
30	*	1.20	2.92	4.63	6.36	8.52	10.69	12.88	15.09	19.58
40	*	0.56	2.29	4.03	5.77	7.97	10.18	12.41	14.67	19.31
50	*	*	2.23	3.49	5.27	7.50	9.76	12.06	14.39	19.23
60	*	*	1.25	3.04	4.85	7.14	9.47	11.84	14.27	19.40
70	*	*	0.85	2.69	4.54	6.90	9.31	11.79	14.36	19.93
80	*	*	0.54	2.43	4.35	6.79	9.32	11.95	14.72	21.03
90	*	*	0.37	2.29	4.28	6.84	9.53	12.38	15.47	23.35
100	*	*	0.23	2.26	4.35	7.09	10.00	13.20	16.87	-
110	*	*	0.23	2.37	4.60	7.57	10.86	14.66	19.80	-
120	*	*	0.34	2.62	5.05	8.37	12.28	17.64	-	-
130	*	*	0.57	3.05	5.76	9.59	-	-	-	-
140	*	*	0.94	3.71	6.88	12.07	-	-	-	-
150	*	*	1.49	4.70	8.73	-	-	-	-	-
160	*	*	2.27	6.25	12.87	-	-	-	-	-

* $y_2 < 0$; Die Werte unterhalb der gestrichelten Linie liegen im ineffizienten Bereich und sind für eine ökonomische Untersuchung nicht relevant

In Tabelle 2.2 sind die entsprechenden Ergebnisse aufgeführt, falls die Dichteänderungen nicht berücksichtigt werden. Ein Vergleich mit Tabelle 2.1 zeigt den relativ kleinen Unterschied für Verkehrsleistungen bis 10000 Pers.km/h und für y_1 Werte kleiner als 100.

Tabelle 2.2: Faktorkombinationen und Verkehrsleistung bei Vernachlässigung der Dichteänderungen nach Gleichung 2.40

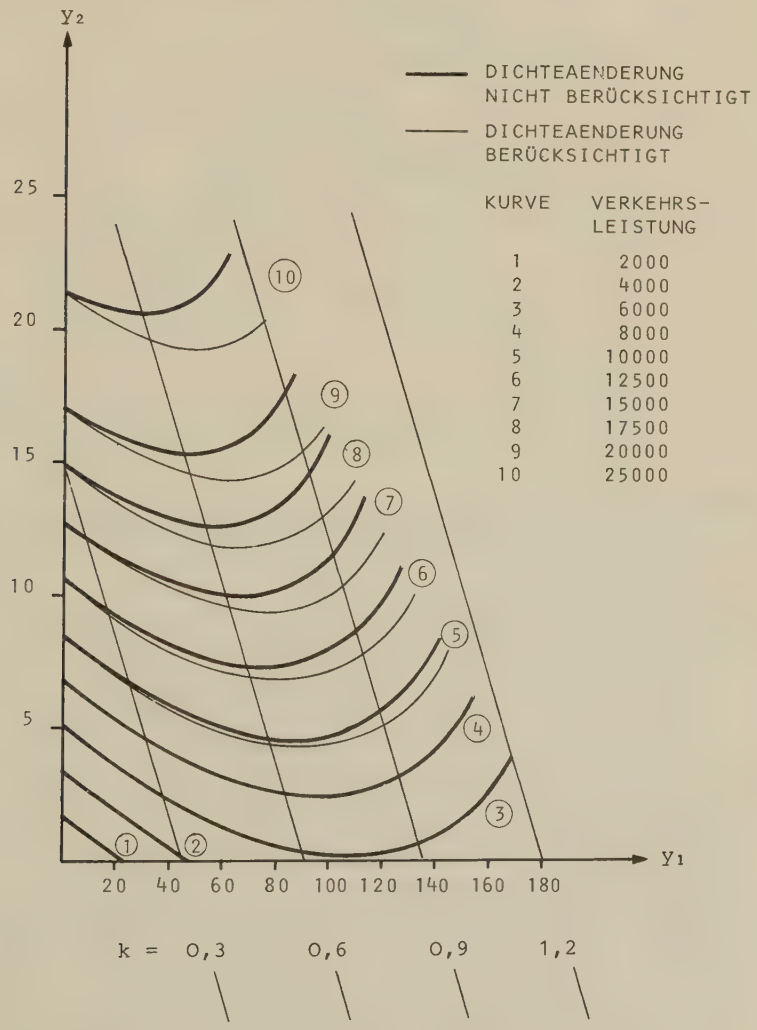
Dichteänderungen nicht berücksichtigt: $k = \frac{y_1 f_1}{cL} + \frac{y_2 f_2}{cL}$										
V =	2000	4000	6000	8000	10000	12500	15000	17500	20000	25000
y_1	y_2 =	y_2 =	y_2 =	y_2 =	y_2 =	y_2 =	y_2 =	y_2 =	y_2 =	y_2 =
0	1.69	3.37	5.06	6.75	8.45	10.56	12.69	14.83	16.99	21.41
10	0.93	2.63	4.33	6.02	7.73	9.57	12.01	14.20	16.41	20.98
20	0.20	1.90	3.61	5.33	7.05	9.23	11.42	13.65	15.92	20.68
30	*	1.21	2.94	4.68	6.43	8.65	10.89	13.19	15.54	20.58
40	*	0.57	2.32	4.09	5.88	8.14	10.46	12.84	15.31	20.75
50	*	*	1.76	3.57	5.40	7.73	10.14	12.63	15.26	21.31
60	*	*	1.28	3.13	5.02	7.44	9.95	12.60	15.45	22.50
70	*	*	0.88	2.79	4.74	7.27	9.93	12.79	15.99	25.44
80	*	*	0.57	2.54	4.58	7.25	10.11	13.30	17.08	-
90	*	*	0.35	2.41	4.51	7.41	10.58	14.28	19.33	-
100	*	*	0.24	2.41	4.70	7.82	11.44	16.19	-	-
110	*	*	0.24	2.55	5.03	8.55	13.00	-	-	-
120	*	*	0.36	2.85	5.62	9.80	16.50	-	-	-
130	*	*	0.62	3.36	6.56	12.11	-	-	-	-
140	*	*	1.02	4.01	8.13	-	-	-	-	-
150	*	*	1.63	5.38	11.30	-	-	-	-	-
160	*	*	2.52	7.50	-	-	-	-	-	-

* $y_2 < 0$; Die Werte unterhalb der gestrichelten Linie liegen im ineffizienten Bereich und sind für eine ökonomische Untersuchung nicht relevant

Die Isoquanten sind in Abbildung 2.6 graphisch dargestellt, sowohl nach Gleichung 2.25 als auch nach Gleichung 2.40. Längs der in der gleichen Abbildung eingetragenen Geraden ist

jeweils k (sofern Dichteänderungen vernachlässigt werden) und damit auch v_1 konstant.

Abbildung 2.6: Verlauf der Isoquanten für verschiedene Verkehrsleistungen



In Abbildung 2.7 sind die Produktivitätskurven für y_1 bei gegebenem y_2 eingezeichnet. Die entsprechenden Verkehrslei-

stungen in Pers.km/h sind in Tabelle 2.3 aufgeführt.

Abbildung 2.7: Verlauf der Produktivitätskurven für y_1

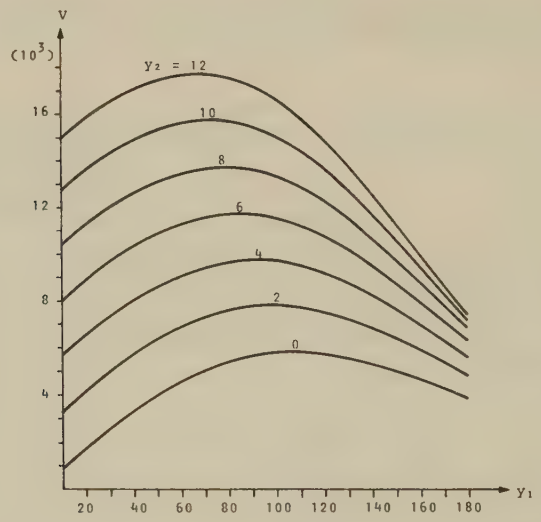


Tabelle 2.3: Verkehrsleistungen in Pers.km/h in Funktion von y_1 und y_2, Dichteänderungen berücksichtigt

		y_2												
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
y_1	10	896	2079	3263	4445	5627	6808	7989	9170	10348	11527	12704	13880	15055
	20	1768	2946	4124	5300	6475	7650	8823	9995	11164	12332	13499	14663	15824
	30	2594	3763	4932	6098	7263	8426	9588	10746	11902	13055	14205	15352	16495
	40	3352	4510	5665	6818	7969	9116	10261	11402	12539	13672	14800	15924	17024
	50	4026	5168	6307	7442	8573	9701	10823	11941	13054	14161	15261	16354	17440
	60	4601	5723	6841	7954	9061	10163	11259	12348	13429	14503	15568	16624	17670
	70	5067	6165	7257	8342	9421	10491	11554	12607	13650	14683	15705	16714	17710
	80	5417	6468	7548	8600	9643	10676	11700	12709	13706	14690	15659	16613	17549
	90	5651	6686	7710	8724	9725	10714	11688	12647	13590	14516	15424	16311	17178
	100	5770	6765	7747	8715	9667	10603	11522	12422	13303	14161	14997	15809	16596
	110	5782	6730	7663	8578	9474	10350	11205	12038	12846	13630	14385	15113	15810
	120	5694	6590	7467	8322	9155	9964	10748	11506	12235	12935	13603	14239	14839
	130	5520	6357	7171	7960	8723	9459	10166	10842	11486	12097	12673	13213	13714
	140	5272	6045	6791	7508	8196	8854	9479	10070	10626	11146	11628	12071	12474
	150	4966	5669	6342	6985	7594	8170	8712	9217	9685	10115	10506	10856	11166
	160	4615	5246	5844	6409	6940	7434	7893	8314	8698	9042	9347	9612	9838
	170	4235	4792	5315	5803	6255	6671	7050	7392	7696	7963	8192	8383	8537
	180	3838	4322	4771	5185	5563	5905	6210	6480	6714	6913	7076	7205	7301

Die maximale PW-Dichte berechnet sich nach Gleichung 2.60 zu

$$k_1 = \frac{y_1}{L} = c\,\frac{\sqrt{2}}{2} = 30 \cdot 0{,}707 = 21{,}21 \text{ PW/km}$$

Die entsprechende Reisegeschwindigkeit ist

$$v_1 = v_0\, e^{-1/2} = 60 \cdot 0{,}607 = 36{,}4 \text{ km/h}$$

und die Verkehrsleistung beträgt

$$V_{pmax} = y_1 v_1 b_1 = 5790 \text{ Pers.km/h}$$

Die Leistungsfähigkeit des Verkehrsträgers ist nach Gleichung 2.11 gegeben durch

$$M_{1\,max} = \frac{\sqrt{2}}{2}\, c\, v_0\, e^{-1/2} = 772 \text{ PW/h}$$

Die Bedingungen 2.63 und 2.64 sind beide nicht erfüllt, es existiert also kein Verkehrsleistungsmaximum für gleichzeitigen Einsatz von y_1 und y_2.

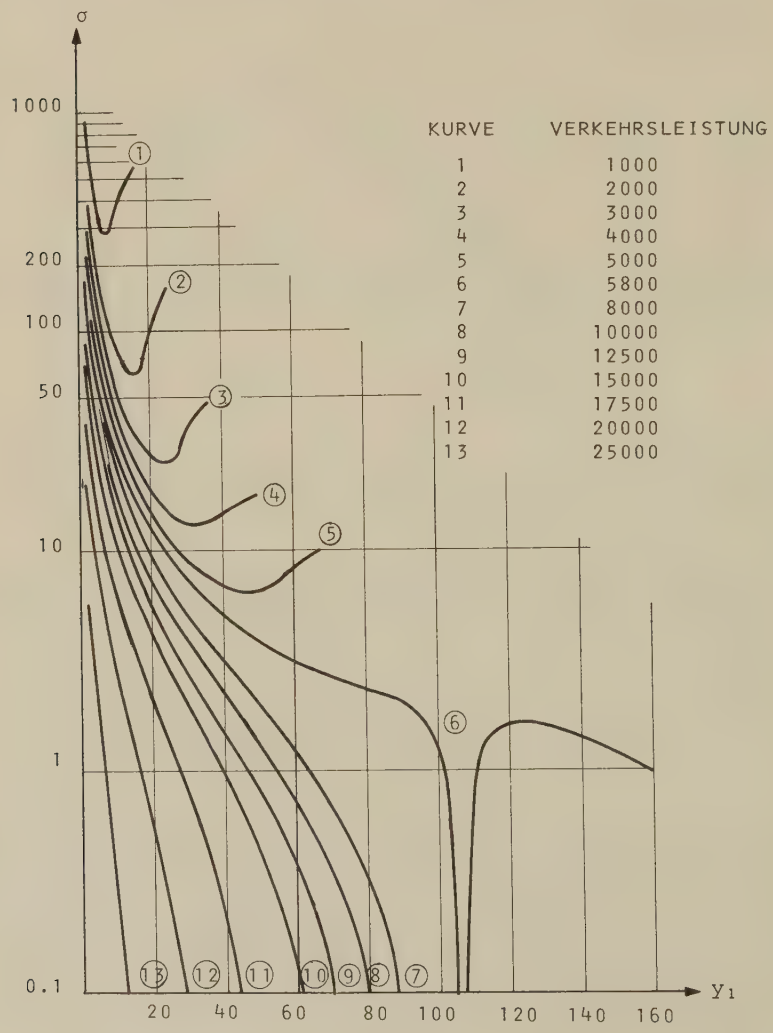
Werden die Dichteänderungen vernachlässigt, dann enthalten die Gleichungen 2.55 bis 2.57 die Bedingungen für strenge Konvexität.

Aus 2.56 folgt $k < 0{,}9$, d.h.
$y_1 < 135$, wenn $y_2 = 0$ bzw.
$y_2 < 45$, wenn $y_1 = 0$

Für $k = 0{,}9$ sind die Gleichungen 2.55 und 2.57 erfüllt. Die Bedingung 2.56, bei deren Herleitung sowohl die Grösse $\frac{y_1 f_1}{cL}$ als auch $\frac{y_2 f_2}{cL}$ durch k ersetzt wurden, ist also allein massgebend. Eine bessere Approximation ist nicht erforderlich, weil mit $k = 0{,}9$ der ökonomisch sinnvolle Bereich vollständig erfasst wird (siehe Abbildung 2.6).

In Abbildung 2.8 ist der Verlauf der Substitutionselastizität für verschiedene Verkehrsleistungen aufgezeichnet, wobei der Einfluss der Dichteänderung nicht berücksichtigt wurde.

Abbildung 2.8: Verlauf der Substitutionselastizität in Funktion von y_1 und der Verkehrsleistung



22. Kostenrechnerische Grundlagen

Unter diesem Titel werden im folgenden die theoretischen Grundlagen zur Bewertung externer Effekte vorgestellt. Obwohl im dritten Kapitel bei der Behandlung einzelner Kostenarten und deren Bewertung auf dieses Kapitel bezug genommen wird, kann sich der eilige Leser auf die Lektüre des zusammenfassenden Abschnittes 227 beschränken.

Sind die Preise der Produktionsfaktoren bekannt, so ist die kostenminimale Faktorkombination auf einer Isoquante durch die Bedingung bestimmt, dass die technische Substitutionsrate gleich dem Verhältnis der Faktorpreise ist.

Diesem Vorgehen stellen sich in unserem Falle bei der Bestimmung des kostenminimalen Modal Split zwei Besonderheiten entgegen: Erstens sind die Preise der eingesetzten Faktoren nicht konstant, sondern von der Verkehrsdichte und -leistung abhängig, zweitens gehen nicht alle Wirkungen, welche bei der Produktion entstehen, in die Kostenrechnung des Verkehrsteilnehmers ein. Diese als externen Effekte bezeichneten Wirkungen, die sich auf den Wohlstand (Nutzenniveau) der Betroffenen auswirken, müssen in einer gesamtwirtschaftlichen Beurteilung berücksichtigt werden. Ist nämlich der Preis eines Faktors zu "tief", so wird dadurch das Faktorpreisverhältnis verändert und die "wahre" kostenminimale Faktorkombination auf der Isoquante verlassen. In den folgenden Abschnitten wollen wir uns etwas eingehender mit diesen Fragen befassen.

221. Begriffe

Die Gesamtkosten für die Erstellung einer Leistung können nach Heinemann (1966, S. 29) unterteilt werden in einzelwirtschaftliche und volkswirtschaftliche Kosten. Als einzelwirtschaftliche, betriebswirtschaftliche oder direkte Kosten wird der "bewertete Mengenverzehr an Gütern und Diensten zum Zwecke der betrieblichen Leistungserstellung" (Fässler (1971)) bezeichnet.

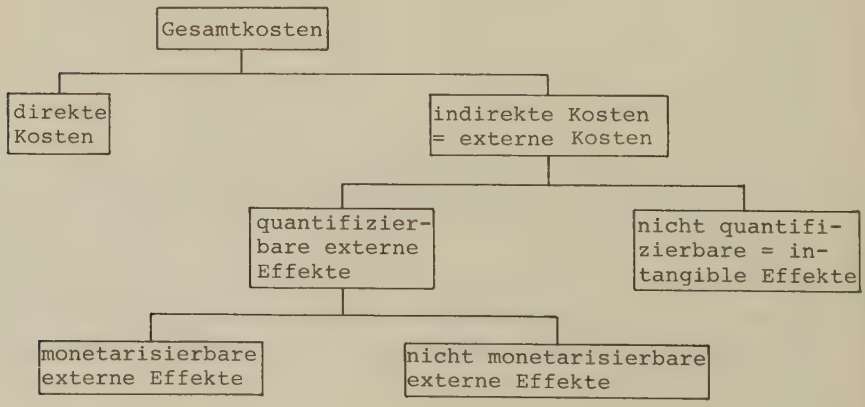
Die volkswirtschaftlichen Kosten sind nach Heinemann jener leistungsbedingte Werteverzehr, der bei Dritten anfällt und nicht in die Kostenrechnung des Verursachers eingeht. Diese nicht direkt vom Produzenten getragenen Kosten werden auch als indirekte oder externe Kosten bezeichnet.

Wesentliches Merkmal der direkten Kosten ist ihre Abgeltbarkeit über den Markt. Nachfrage und Angebot bestimmen den Preis, der zur Bewertung des Mengengerüstes verwendet werden kann.

Die externen Effekte, welche zu externen Kosten führen, zeichnen sich durch folgende Besonderheiten aus (Mishan (1975, S. 109)):

- Sie entstehen zufällig, quasi als Nebenprodukt der Leistungserstellung, beeinflussen jedoch die Produktions- bzw. Nutzenfunktion von Dritten.
- Die Betroffenen können sich gegen externe Effekte nicht abschirmen und ihren Einfluss nur unter Inkaufnahme von Kosten geltend machen.

Externe Effekte können unterteilt werden in quantifizierbare und nicht quantifizierbare (intangible) Effekte. Zu den quantifizierbaren gehören die monetarisierbaren und nicht monetarisierbaren Effekte, so dass wir folgende Gliederung der Gesamtkosten erhalten (GVK (84, S. 5)):



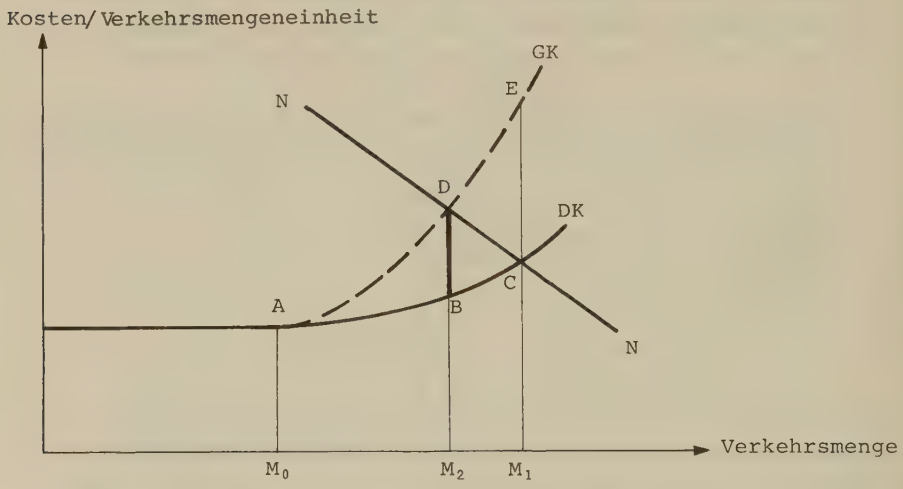
Als quantifizierbare externe Effekte können beispielsweise die Lärmwirkungen bei der Produktion von Verkehrsleistungen betrachtet werden. Massstab zur Quantifizierung der Lärmbelastung wäre der Lärmpegel (siehe Abschnitt 342), während eine Monetarisierung nur möglich ist, wenn der Lärmpegel mit Geldgrössen in Verbindung gebracht werden kann. Die Differenz zwischen Gesamt- und direkten Kosten wird umso kleiner, desto mehr quantifizierbare externe Effekte internalisiert werden können. Eine Möglichkeit, diese Internalisierung durchzuführen, wollen wir im folgenden Abschnitt diskutieren.

222. Die Internalisierung von externen Effekten

Die Internalisierung beruht auf der Idee, den als Nebenprodukt der Leistungserstellung anfallenden externen Effekt in ein Kuppelprodukt zu transformieren, das in den Marktmechanismus eingeht (Mishan (1975, S. 118)). Das grundsätzliche Vorgehen bei der Internalisierung zeigen wir, in Anlehnung an Walters (1961), am Beispiel der Verkehrsballung.

In Abbildung 2.9 ist auf der Abszisse die Verkehrsmenge M aufgezeichnet, die eine Strasse mit gegebener Kapazität befährt. Auf der Ordinate sind die Durchschnitts- (DK) und die Grenzkosten (GK) aufgetragen. Bis zur Verkehrsmenge M_0 ist ein freier Verkehrsfluss ohne gegenseitige Behinderung möglich, die Kosten pro Fahrzeug zur Ueberwindung einer Längeneinheit sind demnach von der Verkehrsmenge unabhängig, die Grenzkosten entsprechen den durchschnittlichen variablen Kosten. Von M_0 an machen sich die Stauungen in zunehmendem Masse bemerkbar, die Durchschnitts- und die Grenzkosten steigen. Da der einzelne Verkehrsteilnehmer seinen Fahrtentscheid aufgrund seiner Durchschnittskosten fällt, ist die DK-Kurve zugleich Angebotskurve. Bei gegebener Nachfrage NN stellt sich im Gleichgewicht die Verkehrsmenge M_1 ein. Gesamtwirtschaftlich gesehen führen die

Abbildung 2.9: Verlauf der Durchschnitts- und Grenzkosten bei der Verkehrsballung nach Walters (1961)



$M_1 - M_2$ Fahrzeuge zu einem Verlust, welcher in Abbildung 2.9 der Fläche CED entspricht und der entsteht, weil die Grenzkosten von M_2 an den Grenznutzen übersteigen. Walters (1961) hat deshalb vorgeschlagen, eine Gebühr pro Verkehrsmengeneinheit zu verlangen, deren Höhe vom Verlauf der Nachfragekurve abhängt und in Abbildung 2.9 BD beträgt. Diese Gebühr kann als Preis für den Strassenraum interpretiert werden, der sich von einem freien zu einem knappen Gut entwickelt, sobald die Verkehrsmenge M_0 erreicht oder überschritten wird. Eine vollständige Internalisierung der externen Effekte ist allerdings auch durch die Erhebung von Gebühren nicht möglich; im eben diskutierten Beispiel kann lediglich verhindert werden, dass die optimale Verkehrsmenge überschritten wird.

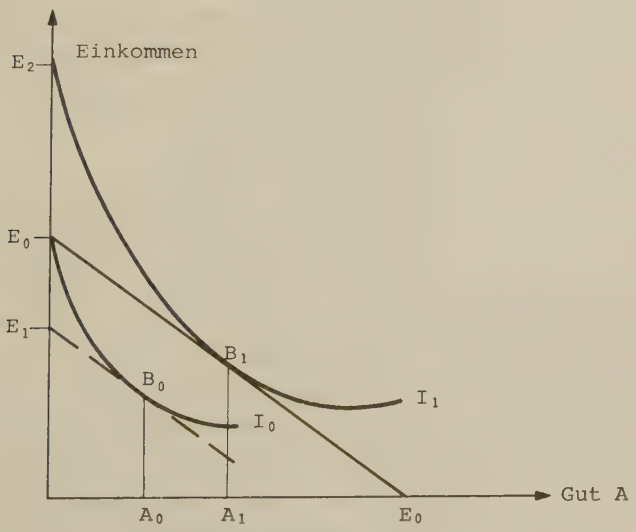
Der Internalisierung durch Einführung eines Preismechanismus sind Grenzen gesetzt. Nach Mishan (1975, S. 119) müssen die Betroffenen (die Verkehrsteilnehmer im obigen Beispiel) Rechte erwerben können (Durchfahrtsrecht), die handelbar (Gebühren-

karte) und substituierbar sind (keine Monopolsituation). Diese Eigenschaften werden von vielen externen Effekten nicht erfüllt, die den realen Wohlstand (= Nutzenniveau) in starkem Ausmass zu beeinträchtigen vermögen. Wir wollen daher im nächsten Abschnitt die theoretischen Konzepte darstellen, die sich zur Bewertung von Externalitäten eignen.

223. Kompensationszahlungen

Die Messung von individuellen Wohlstandsveränderungen kann zur Bewertung von externen Effekten verwendet werden, sofern die Präferenzen des Individuums bekannt sind. Ausgehend von der Definition Marshalls, welche die Konsumentenrente als Geldbetrag bezeichnet, die ein Individuum über den Preis eines Gutes hinaus zu zahlen bereit ist, um in dessen Besitz zu gelangen, hat Hicks (1943) verschiedene Messgrössen eingeführt, um die Wohlstandsveränderungen eines Individuums zu bestimmen. Betrachten wir dazu Abbildung 2.10.

Abbildung 2.10: Wohlstandseffekte bei Einführung eines neuen Gutes



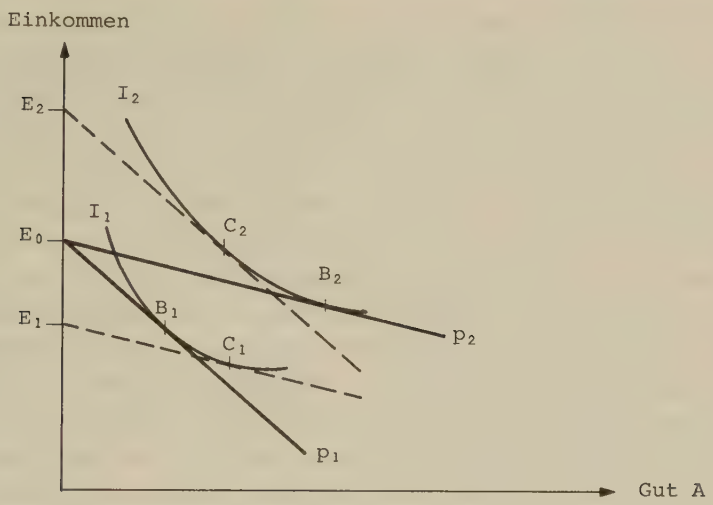
Quelle: Mishan (1975, S. 418)

Auf der horizontalen Achse ist die Menge des neu einzuführenden Gutes A aufgetragen, das zu einem festen Preis erhältlich ist, welcher der Neigung der Butgetlinie E_0E_0 entspricht. Vor der Einführung des Gutes A befindet sich das Individuum im Punkt E_0 auf der Indifferenzkurve I_0 , die das reale Einkommen (Nutzenniveau) misst. Nach Einführung des Gutes A wählt das Individuum den Punkt B_1 , wo sein Nutzenniveau I_1 maximal ist. Die Compensating Variation (CV) nach Hicks, definiert als maximale Summe, die das Individuum zusätzlich zum Kaufpreis des Gutes A zu zahlen bereit ist, kann auf der vertikalen Einkommensachse als Strecke E_0E_1 abgelesen werden. Denn selbst wenn es diesen Betrag als eine Pro Kopf Steuer bei Konsum des Gutes A zahlt, verändert sich sein Wohlstandsniveau I_0 nicht.

Wird die Fragestellung umgekehrt, d.h. wird nach jenem minimalen Geldbetrag gefragt, der dem Individuum gezahlt werden muss, um auf den Kauf des neu eingeführten Gutes zu verzichten, so erhalten wir die Equivalent Variation (EV), die in Abbildung 2.10 durch die Strecke E_0E_2 gegeben ist. Denn mit diesem ihm ausbezahlten Einkommenszuschuss erreicht das Individuum auch ohne Gut A die Indifferenzkurve I_1 , die es bei freier Verfügungsgewalt über sein ursprüngliches Einkommen E_0 hätte erreichen können. Ist der Einkommenseffekt für das Gut A positiv, so liegt B_1 rechts von B_0 (parallele Budgetlinien!), somit ist A_1 grösser als A_0 und die EV grösser als die CV. Bei negativem Einkommenseffekt wäre die Reihenfolge umgekehrt.

Abbildung 2.11 zeigt die Verhältnisse bei einer Preissenkung. Das ursprüngliche Nominaleinkommen ist durch E_0 gegeben, während das reale Einkommen auf der Indifferenzkurve I_1 gemessen wird, welche die Preisgerade p_1 in B_1 berührt. Fällt der Preis auf p_2, so steigt das reale Einkommen von I_1 auf I_2 . Die CV ist in diesem Fall durch E_0E_1 dargestellt und entspricht jener maximalen Summe, die der Konsument über den Kaufpreis zu zahlen bereit ist, um in den Genuss einer Preissenkung zu kommen und ohne sein ursprüngliches Wohlstandsniveau zu verlassen. Sein Nominaleinkommen fällt zwar auf E_1 , aber durch die Preis-

Abbildung 2.11: Wohlstandseffekte bei einer Preissenkung



Quelle: Mishan (1975, S. 431)

senkung erreicht er den Punkt C_1 auf seiner ursprünglichen Indifferenzkurve I_1. Die EV ist im Falle der Preissenkung gegeben durch E_0E_2. Dies ist der minimale nominelle Einkommenszuschuss, der dem Individuum bezahlt werden muss, damit er auf die Möglichkeit verzichtet, das Gut A zum tieferen Preis p_2 zu kaufen. Denn mit dem zusätzlichen Nominaleinkommen erreicht er Punkt C_2 auf der Indifferenzkurve I_2 und ist damit real gleichgestellt wie im Punkt B_2 , d.h. mit kleinerem Nominaleinkommen E_0 und tieferem Preis p_2. Wiederum ist die EV für ein superiores Gut grösser als die CV. Der Fall einer Preissteigerung kann anhand der Abbildung 2.11 leicht nachvollzogen werden, wenn vom Einkommen E_0 und dem Preis p_2 ausgegangen wird. Als Ergebnis stellt sich eine CV ein, die der EV im Falle der Preissenkung entspricht; analoges gilt für die EV. Andere von Hicks definierte Messgrössen wollen wir nicht diskutieren (siehe z. B. Hause (1975)); für verschwindende Einkommenselastizitäten der Nachfrage fallen sie nämlich mit der CV zusammen. Diese Voraussetzung kann auch dann als erfüllt betrachtet werden, wenn die untersuchten Aenderungen von marginaler Grösse sind.

224. Die Bewertung von externen Effekten

Das in Abschnitt 223 dargestellte Konzept kann auch auf die Bewertung externer Effekte übertragen werden. Jede Veränderung eines Zustandes, die sich auf den Umfang der externen Effekte auswirkt, führt zu einer Wohlstandsänderung bei den betroffenen Individuen. Liegen positive externe Effekte vor, so sind die Begünstigten bereit, je einen maximalen Geldbetrag zu zahlen, um weiterhin in den Genuss dieser Externalität zu gelangen. Im umgekehrten Falle finden sich die Betroffenen mit einer Verschlechterung ihres Zustandes nur dann ab, wenn ihnen eine minimale Kompensationszahlung geleistet wird, die den erlittenen Wohlstandsverlust auszugleichen vermag. Gelingt es, die Höhe dieser zu leistenden oder zu empfangenden Geldbeträge, beispielsweise durch Befragung aller Betroffenen, in Erfahrung zu bringen, so könnte diese Summe als Bewertungsmassstab der externen Effekte (bzw. der entsprechenden Aenderung) verwendet werden.

Wird eine Zustandsänderung realisiert, d.h. kommt das CV-Prinzip zur Anwendung, so tritt eine potentielle Wohlstandsverbesserung ein, wenn die Summe aller CV's der Nutzniesser jene der Verlierer übertrifft. Diese Argumentation lässt sich nicht auf die EV-Fragestellung übertragen. In diesem Falle wird ja der bestehende Zustand nicht verändert: Die Summe aller EV's der potentiellen Nutzniesser ist der Betrag, der ihnen als Entschädigung für eine entgangene Verbesserung ausgerichtet wird. Die EV's der Verlierer ergeben zusammen die maximale Summe, die sie für die Beibehaltung des bestehenden Zustandes zu zahlen bereit sind. Ist der Geldbetrag aller Nutzniesser grösser als jener der Verlierer, so kann zwar gefolgert werden, dass die Beibehaltung des bisherigen Zustandes gesamthaft einen Wohlstandsverlust impliziert, nicht jedoch, dass die Aenderung des bestehenden Zustandes zwangsläufig zu einer Wohlstandsverbesserung führt. Wie Mishan (1975, S. 138) zeigt, sind aber auch durch die alleinige Anwendung des

CV-Prinzips Widersprüche möglich, wenn es getrennt auf zwei Situationen A und B angewandt wird. Ist A der Ausgangszustand, so kann ein Wechsel nach B vorteilhaft sein, ebenso aber der Wechsel vom Anfangszustand B nach A. Dieses Paradoxon ist abhängig vom Unterschied zwischen dem minimalen Betrag, den das Individuum zu zahlen bereit ist, um auf den Wechsel zu verzichten und dem maximalen Betrag, den es für die Aenderung auszulegen bereit ist. Dieser Widerspruch ist umso eher zu erwarten, je grösser der Wohlstandseffekt (d.h. der Einfluss auf das Nutzenniveau) ist. Das geschilderte Paradoxon ist nicht zu verwechseln mit jenen, die bei den Wohlfahrtskriterien von Kaldor-Hicks und Scitovsky auftreten. Der Widerspruch bei Mishan tritt in einer Partialbetrachtung (ceteris paribus Bedingungen) auf, während jener bei Kaldor-Hicks durch Aenderung der relativen Preise beim Uebergang von einem Zustand zum anderen bedingt ist (Mishan (1971, S. 20)).

225. Einfluss der Rechtslage auf die Bewertung externer Effekte

Mishan (1967; 1971) hat als erster auf den Einfluss aufmerksam gemacht, den die Gesetzgebung auf das erreichbare Wohlstandsniveau ausübt, wenn eine Tätigkeit mit externen Effekten verbunden ist. Dieser Einfluss ist zweifacher Art; einerseits wird die Höhe der CV-Zahlungen, die letztlich den Wert des externen Effektes bestimmen, von der Rechtslage beeinflusst, andererseits sind die Verhandlungskosten davon abhängig, welche der beiden Parteien die Verhandlungsinitiative zu ergreifen hat.

Beschränken wir uns vorerst auf die Höhe der Kompensationszahlungen. Mit R^+ bezeichnen wir die Rechtslage, welche externe Effekte zulässt; R^- gilt für den umgekehrten Fall. Als Beispiel, an dem wir den Einfluss der Rechtslage aufzeigen wollen, wählen wir eine Strasse, die durch ein bewohntes Gebiet führt. Der externe Effekt sei gegeben durch die Lärmimmissionen, welche die

Gruppe A (Autofahrer) bei der Fahrt durch das Wohngebiet der Gruppe B (Bewohner) produziert.

Gilt R^+ (d.h. Lärm erlaubt), so sei die Gruppe B bereit, der Gruppe A maximal 100 Geldeinheiten (GE) zu zahlen, um sie von einer Fahrt abzuhalten, womit die gleiche Wirkung wie mit einem Lärmverbot (R^-) erzielt würde. Nehmen wir an, die Gruppe A sei nur bei einer Zahlung von mindestens 110 GE bereit, auf ihr Durchfahrtsrecht (d.h. Aenderung von R^+ in R^-) zu verzichten.

Gilt R^-, so sei die Gruppe B erst bei einem Minimalbetrag von 125 GE zu einer Aenderung der Rechtslage bereit, während die Gruppe A maximal 90 GE für ein Durchfahrtsrecht aufwenden will. Bei diesen Zahlungen handelt es sich durchwegs um CV's, die ihnen gestatten, das ursprüngliche Wohlstandsniveau beizubehalten.

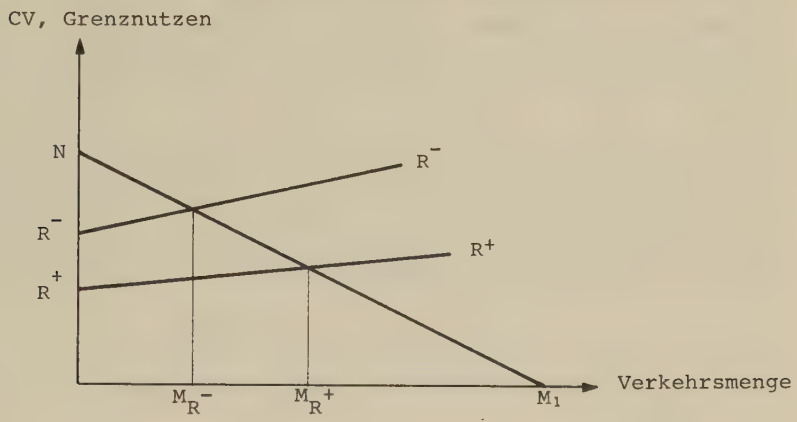
Werden Zahlungen an jemanden mit positivem Vorzeichen versehen und jene von jemandem negativ gezählt, so bedeutet eine positive Summe aller Zahlungen eine Wohlstandsverbesserung, während eine negative einen Wohlstandsverlust anzeigt. Fassen wir die Zahlungsströme zusammen, so erhalten wir folgende Ergebnisse:

Rechtslage	CV der Gruppe B	CV der Gruppe A	Summe
R^+	100	- 110	- 10
R^-	- 125	90	- 35

Im ersten Fall (R^+) würde der Uebergang zu einem Lärmverbot gesamthaft zu einem Wohlstandsverlust führen, der mit 10 GE bewertet wird. Ebenso ergäbe sich, bei der geltenden Rechtslage R^-, ein mit 35 GE zu beziffernder Wohlstandsverlust, wenn diese in R^+ verändert würde; d.h. in beiden Fällen ist die geltende Regelung optimal.

Bisher wurde angenommen, dass der Umfang der Gruppe A konstant ist. Der Einfluss einer variablen Verkehrsmenge ist in Abbildung 2.12 dargestellt.

Abbildung 2.12: Einfluss der Rechtslage auf die optimale Verkehrsmenge



Quelle: Mishan (1975, S. 442)

Längs der Abszisse wird die Verkehrsmenge M gemessen, auf der Ordinate der Grenznutzen und die Grenzkosten. Liegen keine externen Effekte vor, so ist die optimale Verkehrsmenge in M_1 erreicht, wo der Grenznutzen (netto, d.h. nach Abzug der Grenzkosten), dargestellt durch die Kurve NM_1, Null ist. Die Kurve R^+R^+ gibt die CV's der Gruppe B für eine zusätzliche Verkehrsmengeneinheit bei Vorliegen externer Effekte unter der Rechtslage R^+ an; die Kurve R^-R^- gilt bei entgegengesetzter Rechtslage. Normalerweise, d.h. bei positivem Einkommenseffekt, liegt R^-R^- durchwegs über R^+R^+, und die optimale Verkehrsmenge M_{R^-} folglich unter M_{R^+} (siehe Abschnitt 223).

Die optimale Verkehrsmenge kann aber nur erreicht werden, wenn die Gruppen A und B miteinander verhandeln können, oder wenn die Grenzkosten durch Steuern (bzw. Subventionen) verändert werden. In beiden Fällen treten dabei Kosten auf; im Falle der Steuererhebung bei der Berechnung der Steuerhöhe und bei der administrativen Durchsetzung. Wird die optimale Verkehrsmenge (allgemeiner: die optimale Ausbringungsmenge) auf dem Verhandlungswege zu erreichen versucht, so ist mit Kosten zu rechnen beim Verhandlungsprozess, bei der Vertragsüberwachung und

eventuell als Folge von Massnahmen, die zur Vertragsrealisierung erforderlich sind. Diese Kosten können ebenfalls von der Rechtslage abhängig sein und sich damit auch auf die Lage der optimalen Ausbringungsmenge auswirken. In unserem Beispiel, wo unter der Rechtslage R^- die Gruppe A die Verhandlungsinitiative ergreifen müsste, liegen diese vermutlich bedeutend höher als unter R^+, weil allein die Erfassung aller Verkehrsteilnehmer ausserordentliche Schwierigkeiten verursacht. Da die Verhandlungskosten die Lage der Kurve NM_1 in Abbildung 2.12 verändern, kann die optimale Verkehrsmenge M_R- bis auf Null absinken.

226. Die Bewertung von externen Effekten mit Hilfe ökonometrischer Methoden

Verschiedentlich wurde bereits der Versuch unternommen, die Kosten der externen Effekte durch Differenzen bei den Grundstückpreisen zu erklären. Als eine der wichtigsten Arbeiten kann die Untersuchung von Ridker (1967) angesehen werden. Da dieser Ansatz auch für unsere Zwecke geeignet erscheint, wollen wir die von Mishan (1975, S. 321) geäusserten Vorbehalte kurz darlegen.

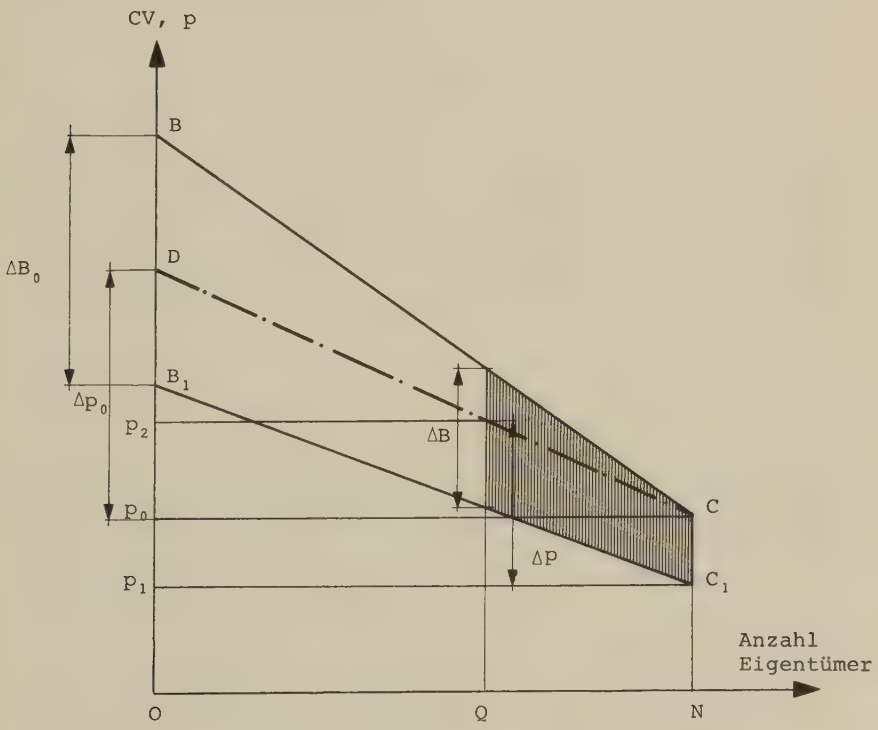
Mishan geht bei seiner Kritik von einem gegebenen Häuserbestand aus, der sich in einem abgegrenzten Quartier befindet. Ohne die Allgemeingültigkeit seiner Aussagen einzuschränken nimmt er an, dass jedes Haus von einer einzigen Familie bewohnt wird und die Umzugskosten vernachlässigt werden können. Weiter wird der Unterschied zwischen CV und EV vernachlässigt und unterstellt, dass alle Familien einen identischen Haustyp bewohnen sowie einen in aller Zukunft auf dem heutigen Stand verbleibenden Lärmpegel erwarten, der den einzigen externen Effekt darstellt.

Sind die Preise aller übrigen Güter konstant (partielle Gleichgewichtsanalyse), so bilden die Preisunterschiede zwischen ruhigen und vom Lärm betroffenen Häusern das uns interessieren-

de Merkmal. Dabei wird angenommen, dass lärmbetroffene Häuser zu Kosten erstellt werden können, die dem Marktpreis früher ruhig gelegener Häuser entsprechen, so dass der Preisunterschied auf eine Höherbewertung ruhiger Häuser zurückgeführt werden kann.

Haben alle Einwohner dieselben Präferenzen, so ergeben sich Bewertungsunterschiede allein wegen der Einkommensunterschiede. In Abbildung 2.13 ist diese ceteris paribus Bewertung als Kurve BC, nach fallendem Einkommen geordnet, dargestellt.

Abbildung 2.13: Wohlstandsverluste durch Lärm in einem idealisierten Häusermarkt



Quelle: Mishan (1975, S. 323)

Bevor die Häuser einer Lärmwirkung ausgesetzt waren, wurden sie mit ONCB bewertet, und der Marktpreis für ein ruhiges Haus betrug im Gleichgewicht p_0, d.h. er entsprach der Bewertung durch den einkommensschwächsten Eigentümer N. Die Kurve B_1C_1 entspricht der Bewertung lärmexponierter Häuser durch die auf der Abszisse nach Einkommen geordenten Eigentümer bei einer bestimmten Lärmbelastung, und ΔB als Differenz der Kurven BC und B_1C_1 gibt den Wertverlust pro Eigentümer an. Werden die Häuser der N-Q Eigentümer vom Lärm betroffen, so ist der Gesamtverlust durch die schraffierte Fläche in Abbildung 2.13 gegeben. Gleichgewicht auf dem Häusermarkt besteht, wenn für ein ruhiges Haus p_2, für ein lärmexponiertes p_1 bezahlt wird. Diese Preise ergeben sich aus der Bedingung, dass der Wertverlust ΔB und die Preisdifferenz Δp für den Q-ten Hausbesitzer gleich gross sind, da dieser beiden Zuständen gegenüber indifferent ist. Die Gerade DC ist somit die Nachfragekurve für ruhige Häuser, B_1C_1 jene für lärmige. In Marktpreisen ausgedrückt ergibt sich ein Wohlstandsverlust von $\Delta p(N-Q)$, der den effektiv auftretenden übersteigt. Bereits dieses sehr vereinfachende Beispiel zeigt, dass ökonometrische Methoden, selbst wenn sie alle relevanten Parameter berücksichtigen, nicht in der Lage sind, die Bewertung externer Effekte ohne systematische Fehler zu ermöglichen.

227. Zusammenfassung

Die Bewertung externer Effekte durch die Messung von Wohlstandsänderungen ist nur möglich, wenn eine Reihe von Voraussetzungen erfüllt sind. Da diese Situation in der Realität selten vorliegt, werden wir uns im folgenden Kapitel mit relativ groben Bewertungsmethoden begnügen müssen, um den Einfluss externer Effekte auf den Modal - Split aufzeigen zu können. Bei der Bewertung der einzelnen externen Effekte (Zeitverluste, Unfälle, Lärm und Abgase) werden wir jeweils den gewählten Ansatz dem theoretischen Konzept gegenüberstellen und die wesentlichen Annahmen aufzeigen.

3. Ermittlung der Verkehrskosten

In diesem Kapitel wollen wir die wichtigsten Kostenarten diskutieren, welche bei einer gesamtwirtschaftlichen Beurteilung der Verkehrsleistung bedeutsam sind. Als Ergebnis dieser Untersuchungen streben wir an, die Kosten pro Leistungseinheit je Verkehrsmittel so zu bestimmen, dass die Kostengleichung in Funktion des unterschiedlichen Faktoreinsatzes (y_1, y_2) angegeben werden kann. Dabei beschränken wir uns auf folgende Kostenarten: die beim Betrieb des Verkehrsmittels anfallenden Betriebskosten, die Kosten für den Unterhalt des Verkehrsträgers, die Zeitkosten der Verkehrsteilnehmer, die Unfallfolgekosten sowie die Lärm- und Abgasvermeidungskosten.

31. Die Betriebskosten der Verkehrsmittel

Die methodischen Grundlagen zur Bestimmung der Betriebskosten wurden durch die AASHO (1959) geschaffen. Die erste, auf europäische Verhältnisse abgestimmte Untersuchung, wurde von Wehner (1964) durchgeführt. Obwohl die Ergebnisse dieser Arbeit durch den im Fahrzeug- und Motorenbau erfolgten technischen Fortschritt an Aussagekraft verloren haben, sind die methodischen Grundlagen praktisch unverändert in die "Richtlinien für wirtschaftliche Vergleichsrechnungen im Strassenwesen" der BRD (RWS (1972)) eingegangen. Auch die von Claffey (1971) für amerikanische Verhältnisse publizierten Ergebnisse beruhen auf diesem Vorgehen, das die Betriebskosten aus folgenden Komponenten bestimmt:

- Treibstoffverbrauch
- Oelverbrauch
- Reifenverbrauch
- Fahrzeugunterhalt
- Wertminderung des Fahrzeugs (Abschreibungen)

Diese Kostenkomponenten sind für jedes Verkehrsmittel (Personenwagen usw.) und jeden Fahrzeugtyp unterschiedlich gross. Da Durchschnittswerte im allgemeinen genügend genau sind, um das kollektive Fahrverhalten zu beschreiben, begnügt man sich damit, pro Verkehrsmittel ein (bzw. wenige) Repräsentativfahrzeug zu untersuchen. Als wichtigstes Kriterium zur Festlegung dieses "durchschnittlichen Fahrzeugs" gilt bei Personenwagen das Fahrzeuggewicht, das wiederum stark mit der Motorleistung korreliert ist.

Die wichtigsten Einflussgrössen, welche die Grösse der Betriebskosten beeinflussen, sind nach Wehner (1964, S. 27):

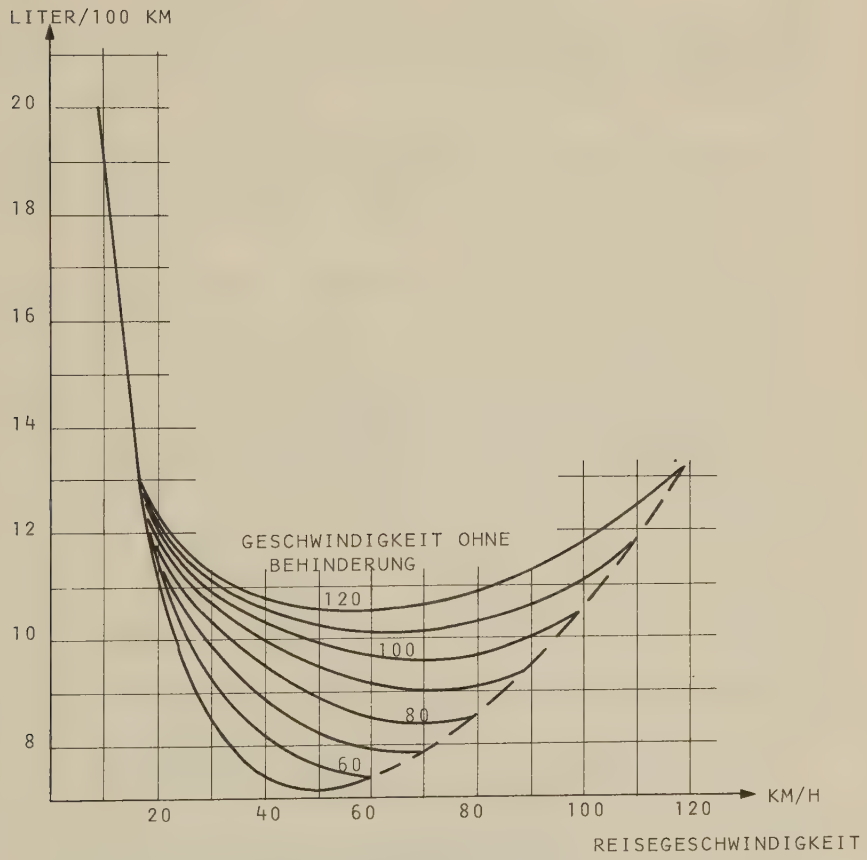
- Strassenverhältnisse: Neigung, Krümmung (d.h. Kurvenradien), Belagsart und -zustand
- Verkehrsbedingungen: im wesentlichen erfasst mit der Reisegeschwindigkeit
- Witterung: trockene bzw. nasse oder gar schneebedeckte Fahrbahn
- Fahrweise: abhängig vom Temperament des Fahrers
- Kenndaten des repräsentativen Fahrzeugs: Fahrzeuggewicht, Hubraum, Alter bzw. Betriebszustand

Diese Bestimmungsgrössen sind nur mit unterschiedlichem Genauigkeitsgrad erfassbar. So kann die Fahrweise beispielsweise nur als durchschnittliches Fahrverhalten berücksichtigt werden. Um die folgende Diskussion zu vereinfachen, beschränken wir uns auf eine ebene, gerade Strasse, gute Belagsverhältnisse und trockene Fahrbahn. Im Einzelfall kann Abweichungen von diesen Bedingungen mit Korrekturfaktoren Rechnung getragen werden.

311. Die Betriebskosten des repräsentativen Personenwagens

3111. Treibstoffverbrauch

Abbildung 3.1: Treibstoffverbrauch in Abhängigkeit von der Reisegeschwindigkeit und der Geschwindigkeit ohne Verkehrsbehinderung



Quelle: Meyer (1971)

Der Treibstoffverbrauch wird in erster Linie vom Hubraum und der Reisegeschwindigkeit v_1 (siehe Abschnitt 2133) bestimmt. Für das Jahr 1975 und für schweizerische Verhältnisse, auf die wir im weiteren abstellen, gilt:

Hubraum: ca. 1560 cm^3 ; Esta (566, S. 298)
Leistung: ca. 51,5 kW ; Meewes (1974, S. 42)

Der Verlauf des Treibstoffverbrauchs in Abhängigkeit vom Behinderungsgrad, gemessen als Unterschied zwischen Reisegeschwindigkeit und Geschwindigkeit ohne Behinderung, kann der Abbildung 3.1 entnommen werden.

Wie man sieht, liegt der Verbrauch pro km bei gegebener Reisegeschwindigkeit umso höher, je grösser die Geschwindigkeit bei freier Fahrt ist.

Wir wollen für unsere Zwecke eine andere Darstellungsweise wählen, die den Treibstoffverbrauch direkt als Funktion der Reisezeit pro Kilometer angibt. Diese Methode wurde auch von Everall (1968) verwendet, der im Stadtgebiet Londons auf Testfahrten den Treibstoffverbrauch verschiedener Fahrzeugkategorien ermittelte und dabei eine lineare Abhängigkeit von der Reisezeit feststellen konnte. Nebelung (1976, S. 62) gibt folgende Verbrauchsfunktion an:

$$r'_{111} = 5{,}48 \frac{P^{0{,}388}}{v_1^{0{,}576}} \quad \{\text{Liter/100 km} \quad (3.1)$$

$$5 < v_1 < 60 \text{ km/h}$$

P: Fahrzeuggewicht in kg

v_1: Reisegeschwindigkeit in km/h

r_{ijn}: (bzw. r'_{ijn}, r''_{ijn}, r'''_{ijn}), Verbrauchsfunktionen
i: Verkehrsmittel (i = 1, 2)
j: Kostenart
1: Betriebskosten Verkehrsmittel
2: Betriebskosten Verkehrsträger
3: Zeitkosten
4: Unfallfolgekosten
5: Lärmvermeidungskosten
6: Abgasvermeidungskosten

n: Kostenartengruppe, für j = 1 bedeuten
n=1: Treibstoffverbrauch (in l/100 km)
2: Oelverbrauch
3: Reifenverbrauch
4: Fahrzeugunterhalt
5: Abschreibungen

Gleichung 3.1 kann für den repräsentativen Personenwagen mit P = 950 kg näherungsweise geschrieben werden als

$$r'_{111} = 5,5 + 0,0406 \cdot t_1^* \; ; \; \{\text{Liter/100 km}\} \qquad (3.2)$$

wobei t_1^* die Reisezeit in sec/km angibt. Wegen der Bedingung in Gleichung 3.1 muss $60 < t_1^* < 720$ sein.

Meewes (1974, S. 81) ermittelte für den repräsentativen Personenwagen Deutschlands folgende Verbrauchsfunktion:

$$r''_{111} = \{\frac{85}{v_1^{0,7}} + 0,662 \cdot e^{0,0178 v_1}\} \cdot e^{\{9,7 - \frac{(v_1-120)^2}{1950}\}(\mu + \frac{s}{100})} \qquad (3.3)$$

v_1: Reisegeschwindigkeit in km/h

μ : Grundwiderstandswert, für ebene Strassen mit guter Fahrbahnoberfläche ca. 0,015

s : Neigung, in unserem Fall 0 %

Für die angegebenen Werte von μ und s erhält man

v_1	:	10	20	30	40	50	60	km/h
r''_{111}	:	24,3	15,5	12,2	10,5	9,5	8,9	Liter/100 km

Gleicht man diese Werte im $r_{111} - t_1^*$ Diagramm aus, so geht Gleichung 3.3 über in

$$r''_{111} = 7,2 + 0,0466 \cdot t_1^* \qquad \{\text{Liter/100 km}\} \quad (3.4)$$

Schliesslich sind noch die Werte zu erwähnen, die Pelli (1977) im Zusammenhang mit der Erarbeitung des Emissionskatasters der Schweiz berechnet hat:

$$r'''_{111} = 7,4 + 0,0463 \cdot t_1^* \qquad \{\text{Liter/100 km}\} \quad (3.5)$$

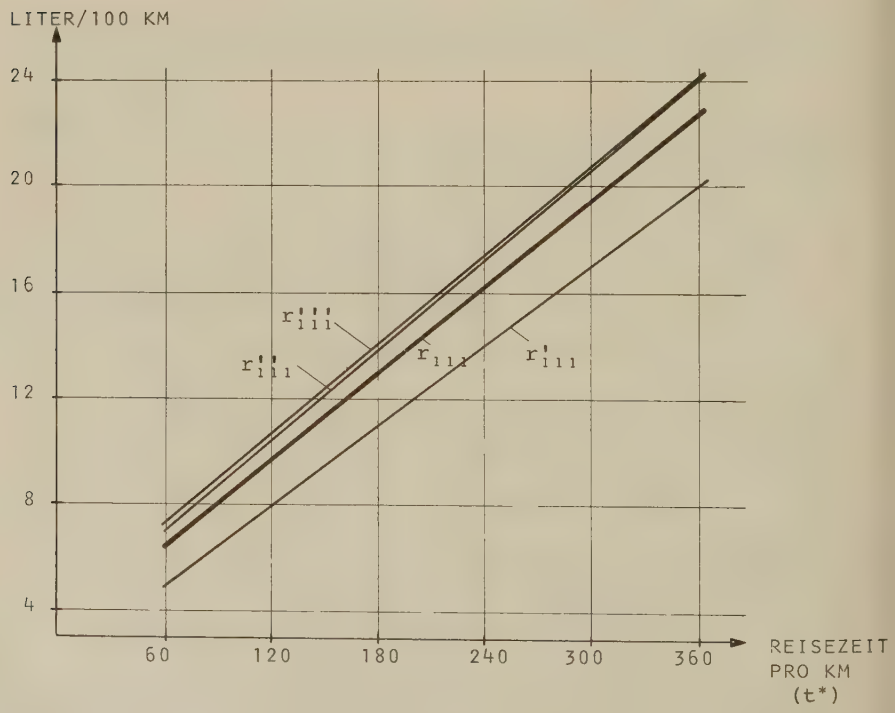
Wir werden im folgenden eine Verbrauchsfunktion verwenden, die dem Mittelwert der Gleichungen 3.2, 3.4 und 3.5 entspricht:

$$r_{111} = 6{,}7 + 0{,}0445\ t_1^* \qquad \{\text{Liter/100 km}\} \qquad (3.6)$$

$$\text{bzw.} \quad r_{111} = 9{,}37 + 0{,}0445\ (t_1^* - 60) \qquad (3.7)$$

wobei $t_1^* \geq 60$ sec vorausgesetzt wird. In Abbildung 3.2 sind die Verbrauchsfunktionen 3.2, 3.4, 3.5 und 3.6 dargestellt.

Abbildung 3.2: Treibstoffverbrauch in Abhängigkeit von der Reisezeit pro Kilometer



3112. Oelverbrauch

Die Erfassung des Oelverbrauchs in Abhängigkeit von den Strassen- und Verkehrsbedingungen ist bedeutend schwieriger als die Bestimmung des Treibstoffverbrauchs. Claffey (1971, S. 12) nennt drei Faktoren, welche den Oelverbrauch hauptsächlich bestimmen: Verschmutzung durch Verbrennungsrückstände, vor allem im behinderten Verkehr; Verluste durch Verbrennung und Verdunstung bei hohen Betriebstemperaturen; Undichtigkeiten. Weit wichtiger als die Kosten für den Oelverbrauch sind die Aufwendungen, welche für Unterhalt und Reparaturen anfallen, wenn durch ungenügenden Oelwechsel der Verschleiss des Motors zunimmt; damit zeigt sich auch, dass eine genaue Abgrenzung zwischen den aufgezählten Kostenartengruppen nicht möglich ist.

Richtwerte für den Oelverbrauch amerikanischer Personenwagen finden sich in Claffey (1971, S. 37). Gegenüber flüssigem Verkehrsablauf steigt der Oelverbrauch im behinderten Stadtverkehr auf das Dreifache; zusätzlich sind die Undichtigkeiten sowie der Verbrennungsanteil zu berücksichtigen, der sich im Ballungsverkehr etwa verdoppelt. Schliesslich führt Claffey noch spezielle Verluste für Halte- und Anfahrmanöver an. Ob sich diese Angaben auf europäische Verhältnisse übertragen lassen, müsste empirisch nachgewiesen werden. In Anlehnung an Wehner (1964, S. 78) und Meyer (1971, S. 29) wird eine direkte Proportionalität zwischen Oel- und Treibstoffverbrauch angenommen:

$$r_{112} = 0{,}01 \cdot r_{111} \quad \{\text{Liter/100 km}\} \qquad (3.8)$$

3113. Reifenverbrauch

Die Untersuchungsergebnisse Claffeys (1971, S. 31) lassen erkennen, dass die Belagsart (Asphalt oder Beton), Geschwindigkeit, Neigung und Radbelastung den grössten Einfluss auf den Abrieb ausüben. Insbesondere der von den Antriebs- und Brems-

momenten hervorgerufene Schlupf und die quer zur Fahrzeuglängsachse auftretende Beanspruchung des Reifens bei Kurvenfahrt sind nach Wehner (1964, S. 83) für die Abnützung des Reifens ausschlaggebend. Vergleicht man den Verbrauch bei konstanter Geschwindigkeit von 50 km/h mit jenem, der bei einer Fahrt mit Beschleunigung aus dem Stillstand bis auf 50 km/h und anschliessender Verzögerung bis zum Stillstand entsteht, so steigt er im zweiten Fall auf das Siebenfache an.

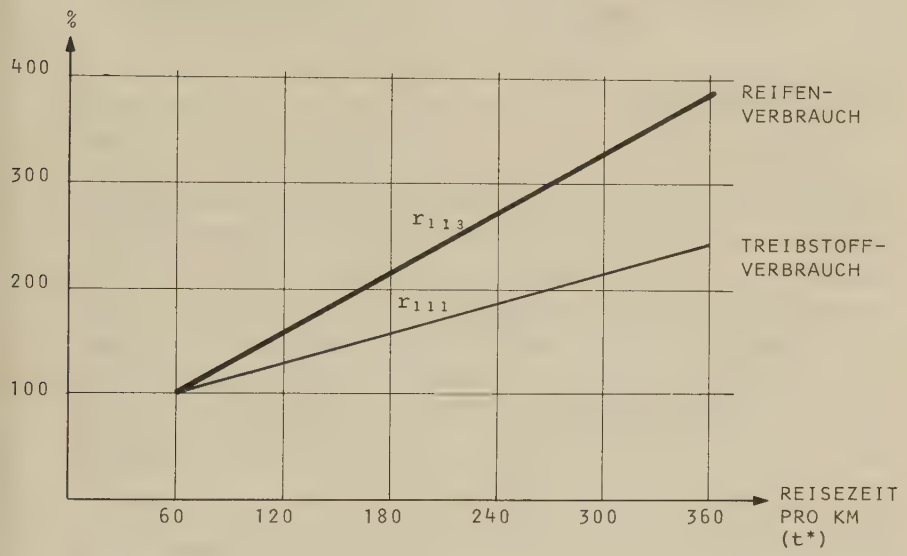
Da Fahrweise und Treibstoffverbrauch voneinander abhängig sind, ist auch die Unterstellung eines Zusammenhanges zwischen Treibstoff- und Reifenverbrauch naheliegend. Wehner (1964, S. 69) geht von der Annahme aus, dass der Reifenverbrauch mit sinkender Reisegeschwindigkeit doppelt so stark zunimmt wie der Treibstoffverbrauch. Die Laufleistung eines Reifens unter idealen Bedingungen (keine Geschwindigkeitswechsel, ebene und gerade Strecke) setzt er auf 80 000 km an. Amerikanische Versuchsergebnisse ergeben Laufleistungen von 50 000 km. Wir wählen als Mittelwert, in Anbetracht des grösseren Gewichtes amerikanischer Personenwagen, 70 000 km und erhalten somit

$$r_{113} = \frac{1}{70\ 000} \{1 + \frac{2}{9{,}37} \cdot 0{,}0445\ (t_1^*-60)\}$$

$$= \frac{1}{70\ 000} \{1 + 0{,}0095\ (t_1^*-60)\} \quad \{\text{Reifenverbrauch/km}\} \qquad (3.9)$$

Der Funktionsverlauf von r_{113} ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

Abbildung 3.3: Zunahme des Reifenverbrauchs in Abhängigkeit von der Reisezeit pro Kilometer



3114. Fahrzeugunterhalt

Zum Fahrzeugunterhalt gehören nach Wehner (1964, S. 101) alle Aufwendungen, welche für die Prüfung und Wartung des Fahrzeugs anfallen (exklusive Wagenpflege, z.B. Waschen).

Eine Aufteilung dieser Aufwendungen in fahrleistungsabhängige und verkehrsbedingte ist noch schwieriger vorzunehmen als bei den oben besprochenen Kostengruppen. Zwar ist der Einfluss der Verkehrsbehinderungen auf den Verschleiss von Kupplung, Bremsen und Getriebe offensichtlich, nur ist eine genaue Quantifizierung bis heute nicht möglich. Mehrheitlich als fahrleistungsabhängig können die Aufwendungen für den Ersatz von Kerzen, Oelfilter usw. angesehen werden. Wir übernehmen im weiteren die Annahmen Wehners (1964, S. 101), der, gestützt auf Aussagen von Fachleuten, folgende Aufteilung der Fahrzeug-

unterhaltskosten vornimmt:

- ein Drittel der Kosten rein fahrleistungsabhängig
- zwei Drittel proportional zum Treibstoffverbrauch.

3115. Abschreibungen

Wehner (1964, S. 107) führt die Wertminderung des Fahrzeugs auf zwei Ursachen zurück. Etwa die eine Hälfte der Abschreibungen ist seinen Untersuchungen zufolge rein altersbedingt, die andere kann den Fahrleistungen zugerechnet werden. Diesen Teil der Wertminderung teilt Wehner wiederum in zwei Komponenten auf; wie beim Fahrzeugunterhalt nimmt er an, dass ein Drittel davon rein fahrleistungsabhängig ist, während der Rest mit dem Treibstoffverbrauch variiert. Als Gesamtfahrleistung eines Fahrzeugs unter idealen Bedingungen nimmt er 200'000 km an.

Meyer (1971, S. 32) kommt nach Auswertung verschiedener Unterlagen zu einer rein fahrleistungsabhängigen Abschreibung von 20 %, bei einer durchschnittlichen jährlichen Fahrleistung von 15 000 km. Allerdings sind diese Angaben als Durchschnittswerte für alle Strassen- und Verkehrsbedingungen zu betrachten. Für die folgenden Berechnungen übernehmen wir die von Wehner getroffenen Annahmen.

3116. Betriebskosten pro Fahrzeugkilometer

Der Beschaffungspreis des repräsentativen Personenwagens für 1975 ist ein gewogener Mittelwert und wird den ACS (1975) Berechnungsgrundlagen entnommen, ebenso der durchschnittliche Reifenpreis. Um den Einfluss der fiskalischen Belastungen, die insbesondere beim Treibstoff mehr als die Hälfte des Tankstellenpreises erreichen, auf die Lage der kostenminimalen Faktorkombination aufzeigen zu können (siehe Kapitel 4), werden die Betriebskosten mit und ohne fiskalische Belastungen bestimmt.

Die durchschnittliche Zollbelastung pro Fahrzeug beträgt nach FRS (1976) ca. Fr. 660.--, die durchschnittliche Warenumsatzsteuerbelastung ca. Fr. 770.-- (FRS (1976, S. 56)).

Die Belastung der Treibstoffe durch Zölle und Gebühren beträgt 57 Rp./Liter, der Tankstellenpreis (1975!) 98 Rp./Liter, so dass ein Preis zu Faktorkosten von 41 Rp./Liter resultiert.

Die Elimination der Treibstoffzollzuschläge drängt sich auch aus einem anderen Grunde auf: Da wir die Wegekosten gesondert berücksichtigen, so weit sie überhaupt entscheidungsrelevant sind (siehe Abschnitt 32), würden andernfalls gewisse Kosten doppelt erfasst. Dieselbe Ueberlegung ist auch für den Ausschluss der Motorfahrzeugsteuern wegleitend. Die Aufwendungen für die Motorfahrzeugversicherung werden im Abschnitt 34 gesondert untersucht.

Die Fahrzeugunterhaltskosten für den repräsentativen Personenwagen liegen bei Fr. 9.--/100 km. Dieser Erfahrungswert kann als unterer Grenzwert für durchschnittliche Strassen- und Verkehrsbedingungen angesehen werden (ACS (1975)).

Die Preise für Motorenöl weisen einen grossen Streubereich auf, welcher auf die unterschiedliche Qualität sowie den Markennamen zurückzuführen ist. Als Durchschnittswert kann, angesichts der relativ untergeordneten Bedeutung, welche den Kosten des Oelverbrauchs insgesamt zukommt, mit Fr. 5.--/Liter gerechnet werden.

Fassen wir alle Kosten zusammen, so können die pro Fahrzeugkilometer anfallenden Betriebskosten wie folgt ermittelt werden:

$$c_{11} = \sum_{n=1}^{5} r_{11n} \cdot p_n = \sum_{n=1}^{5} c_{11n} \qquad \{Rp./Fz.km\} \qquad (3.10)$$

$$c_{111} = \{9{,}37 + 0{,}0445(t_1^* - 60)\} \cdot 0{,}41 \qquad (3.11)$$

$$c_{112} = r_{111} \cdot 0{,}01 \cdot 5 \qquad (3.12)$$

$$c_{113} = r_{113} \cdot p_3$$

mit p_3 = Preis von 4 Reifen = Fr. 450.-- gilt

$$c_{113} = \{100 + 0{,}95(t_1^*-60)\} \cdot \frac{450}{70000} \qquad (3.13)$$

Die Unterhaltskosten von Fr. 9.--/100 km sind zu einem Drittel nur von der Fahrleistung abhängig, zu zwei Dritteln vom Treibstoffverbrauch (siehe Abschnitt 3114), somit

$$c_{114} = 3 + \{100 + 0{,}475(t_1^*-60)\} \cdot 0{,}06 \qquad (3.14)$$

Die Abschreibungen werden bezogen auf die Hälfte der Beschaffungskosten (Fr. 13 000.--) abzüglich Warenumsatzsteuer und Zölle (660 + 770 Franken) sowie Reifen (Fr. 450.--), d.h. auf Fr. 5 560.--. Nach Abschnitt 3115 erhalten wir

$$c_{115} = 0{,}92 + \{100 + 0{,}475(t_1^*-60)\} \cdot 0{,}0185 \qquad (3.15)$$

Eingesetzt in Gleichung 3.10 führt zu

$$c_{11} = 16{,}7 + 0{,}064(t_1^*-60) \quad ; \quad \{Rp./Fz.km\} \qquad (3.16)$$

beziehungsweise, wenn die fiskalischen Belastungen des Treibstoffes ebenfalls berücksichtigt werden:

$$c_{11} = 22{,}1 + 0{,}089(t_1^*-60) \quad ; \quad \{Rp./Fz.km\} \qquad (3.17)$$

312. Die Betriebskosten des Busses

Grundsätzlich können die Betriebskosten des Busses in analoger Art wie jene des Personenwagens berechnet werden. Angaben über den Treibstoffverbrauch im öffentlichen Personenverkehr finden sich, in Funktion von Reisegeschwindigkeit, Besetzungsgrad und Fahrzeugleergewicht, in Nebelung (1976, S. 76). Damit sind die restlichen Verbrauchsfunktionen, sofern dieselben Abhängigkeiten wie beim Personenwagen unterstellt werden, ebenfalls be-

stimmbar. Die betrieblichen Besonderheiten öffentlicher Verkehrsunternehmungen sprechen für eine andere Vorgehensweise, und zwar aus folgenden Gründen:

- Oeffentliche Verkehrsbetriebe werden nach unternehmerischen Grundsätzen geführt. Sie verfügen deshalb über eine weitgehend selbständige Organisation, deren Aufgabe die Befriedigung von Verkehrsbedürfnissen ist. Im Gegensatz zum Eigenverkehr (den wir für unsere Arbeit mit dem Individualverkehr gleichsetzen dürfen), wo Angebot von und Nachfrage nach Verkehrsleistungen dem gleichen Entscheidungsträger unterliegen, muss sich das Verkehrsunternehmen in der Regel darauf beschränken, das Angebot mit minimalen Kosten der sich zeitlich und räumlich ändernden Nachfrage anzupassen.

- Betriebs-, Fahrplan- und Beförderungspflicht haben einen wesentlichen Einfluss auf die Betriebskosten. So muss das Angebot auch dann aufrechterhalten werden, wenn die Nachfrage sehr gering ist (z.B. Sonn- und Feiertage, Abendstunden); das Angebot muss aber auch zu Spitzenstunden der Nachfrage genügen können, was unausgelastete Kapazitäten zur Folge hat usw.

- Da die angebotenen Verkehrsleistungen, im Gegensatz zum Individualverkehr, verkauft werden müssen, ist ein besonderes Vertriebssystem erforderlich, dessen Kosten ebenso in die Betriebsrechnung eingehen wie jene, die bei der Vorbereitung des Fahrzeugeinsatzes, bei der Garagierung, der Wagenreinigung usw. anfallen.

- Oeffentliche Verkehrsunternehmen verfügen über historisch bedingte Strukturen, die in erster Linie vom Verkehrsnetz bedingt sind. Auch diese Besonderheiten finden in der Kostenrechnung ihren Niederschlag; vor allem aber erschweren sie allgemeingültige Aussagen und zwischenbetriebliche Vergleiche.

Es ist deshalb besser, im konkreten Fall von der Betriebsrechnung der untersuchten Verkehrsunternehmung auszugehen und zu versuchen, die Kostenänderungen zu bestimmen, die bei der Ausweitung des Angebots entstehen. Dadurch können auch die Einflüsse gesetzlicher Bewertungsvorschriften (Abschreibungen, Kapitaldienst, nicht aktivierbare Bau- und Erneuerungskosten) aufgezeigt und allenfalls erforderliche Korrekturen vorgenommen werden, um die betriebswirtschaftlich relevanten Kosten zu ermitteln. Auf die Besonderheiten, welche vom technischen Fortschritt im Fahrzeugbau, von der Unternehmungspolitik, von der Geldentwertung usw. auf die Betriebsrechnung ausgehen, kann hier nur hingewiesen werden.

Angesichts all dieser Unsicherheiten ist es wenig sinnvoll, die Betriebskosten als Funktion der Reisegeschwindigkeit anzugeben. Dieses Argument wird durch eine weitere Eigenart des öffentlichen Verkehrsmittels gestützt. Im Unterschied zum Individualverkehr muss das öffentliche Verkehrsmittel seine Fahrt an jeder Haltestelle unterbrechen. Dadurch sinkt die Reisegeschwindigkeit beträchtlich, und die notwendigen Beschleunigungs- und Verzögerungsmanöver führen auch bei unbehindertem Verkehrsfluss zu erhöhtem Treibstoffverbrauch und geben Anlass zu gesteigertem Verschleiss. Die Annahme konstanter Betriebskosten, unabhängig von der Reisegeschwindigkeit, scheint auch dadurch gerechtfertigt, dass die in der Betriebsrechnung ausgewiesenen Kostengrössen die durchschnittlichen Verhältnisse in etwa wiedergeben.

Wir wollen versuchen, im folgenden jene Kostenarten aus der Betriebsrechnung herauszugreifen, welche durch die Substitution privater durch öffentliche Verkehrsmittel beeinflusst werden. Dazu betrachten wir in Tabelle 3.1 den grundsätzlichen Aufbau der Kostenrechnung einer Verkehrsunternehmung (in Anlehnung an die Betriebsrechnung der Verkehrsbetriebe der Stadt Zürich):

Tabelle 3.1: Gliederung der Betriebskosten einer Verkehrsunternehmung

Fahrzeug	Variable Kosten Verbrauchsstoffe Treibstoffe Unterhalt (Löhne und Sachaufwand) Gemeinkostenanteil Fixe Kosten Abschreibungen Versicherungen und Schadenersatz Gemeinkostenanteil	Mit Individualverkehr vergleichbare Kostenarten
Fahrdienst	Zugförderung (Chauffeur) Zugbegleitung (Kontrolldienst)	Im Individualverkehr nicht auftretende oder nicht berücksichtigte Kostenarten
Depot- und Garagedienst	Variable Kosten (Reinigung) Fixe Kosten (Amortisation Anlagen)	
Unterhalt der Anlagen	Unterbau/Oberbau Haltestellen/Wartehallen Fernmelde- und Sicherungsanlagen	
Abrechnung und Verkauf		
Verwaltung		

Bezogen auf die Reagibilität der einzelnen Kostenarten bei Ausweitung des Verkehrsangebotes lassen sich folgende Aussagen machen:

- Eine eindeutige Zuordnung der zusätzlich entstehenden Kosten ist für die Fahrzeug-, die leistungsabhängigen Depot- und Garagedienst- sowie die Fahrdienstkosten möglich, die unmittelbar mit der Leistungserbringung anfallen.
- Für die übrigen Kostenarten müssen Annahmen getroffen werden, die den wirklichen Gegebenheiten Rechnung tragen:

- Bei den Verwaltungskosten ist eine genaue Zurechnung auf den Kostenträger nicht möglich oder mit zu grossem Aufwand verbunden. Als geeignete Schlüsselungsgrösse kann die Anzahl geleisteter Wagenkilometer angesehen werden. Wir unterstellen, dass diese Proportionalität auch bei einer Ausweitung des Fahrzeugparks erhalten bleibt.

- Die fixen Kosten des Depot- und Garagedienstes entsprechen im wesentlichen den Abschreibungen und dem Kapitaldienst für die Anlagen. Die Zusatzkosten sind Null, solange freie Kapazitäten vorhanden sind; sie nehmen sprunghaft zu, sobald neue Anlagen erstellt werden müssen. Sowohl für die fixen wie die variablen Kosten wird die Annahme getroffen, dass eine direkte Proportionalität zur Anzahl Fahrzeuge besteht und diese auch bei einer Ausweitung des Fahrzeugparks erhalten bleibt.

- Für den Unterhalt der Haltestellen und Wartehallen wird angenommen, dass dieser von der Höhe des Verkehrsaufkommens unabhängig ist, während der Unterhalt des Ober- und Unterbaus sowie die Kosten der Fernmelde- und Sicherungsanlagen direkt proportional zur Fahrzeugzahl zunehmen sollen.

- Die Kosten für Abrechnung und Verkauf sind in erster Linie von der Verkehrsleistung abhängig. Sie werden proportional auf die Kilometerleistung des Fahrzeugparks umgelegt und es wird unterstellt, dass zusätzliche Fahrzeuge gleich hohe Kosten verursachen.

- Eine besondere Stellung im Vergleich zum Individualverkehr nehmen die Aufwendungen für den Fahrdienst ein. Sie stellen Dienstleistungsabgänge dar, welche für die Leistungserstellung notwendig und darum auch als Betriebskosten anzusehen sind. Diese zeitabhängigen Kosten werden im Abschnitt 33 behandelt.

Zahlenmässige Angaben über die Betriebskosten des Busses (c_{21}) für stadtzürcherische Verhältnisse werden im 4. Kapitel hergeleitet.

32. Die Betriebskosten des Verkehrsträgers

In diesem Abschnitt wollen wir der Frage nachgehen, welche aus dem Betrieb des Verkehrsträgers stammenden Aufwendungen den Verkehrsmitteln Personenwagen und Bus als leistungsabhängige Kosten zugerechnet werden können.

321. Grundsätzliches

Investitionen in Strassenanlagen, mit entsprechenden Kostenfolgen, dienen entweder der Kapazitätserneuerung oder -erweiterung. Ist der Investitionsentscheid einmal gefallen und die Anlage erstellt, so fallen die kalkulatorischen Kosten (Amortisation, Kapitaldienst) praktisch unabhängig von der Kapazitätsauslastung an. Wir gehen davon aus, dass der von uns untersuchte Korridor bereits existiert. Demzufolge sind diese fixen Kosten bei der Frage nach der kostenminimalen Verkehrsteilung nicht entscheidungsrelevant, zumindest solange nicht, als wir die Annahmen, welche wir im Abschnitt 14 formulierten, aufrechterhalten.

Wenn wir im folgenden von Betriebskosten des Verkehrsträgers sprechen, so verstehen wir darunter all jene Aufwendungen, welche in bezug auf seine Benützung variabel sind. Wir müssen also untersuchen, ob zwischen den einzelnen Kosten und der Beanspruchung durch die Verkehrsmittel Abhängigkeiten bestehen, welche eine Schlüsselung auf die Kostenträger ermöglichen. Auf eine Schwierigkeit haben wir bereits bei der Diskussion der Betriebskosten hingewiesen: Investitions- (bzw. Anschaffungs-) und Betriebskosten sind insofern miteinander verknüpft, als grössere Investitionskosten (bzw. häufigerer Wechsel der Busflotte) Ersparnisse bei den leistungsabhängigen Kostenarten ermöglichen und umgekehrt. Diese Frage muss bereits beim Investitionsentscheid beantwortet werden (optimales Investitions-

volumen) und steht hier nicht zur Diskussion.

Die Kostenträgerrechnung setzt voraus, dass die Kosten- und Leistungsgrössen (Verkehrszusammensetzung, -menge usw.) über einen genügend grossen Zeitraum hinweg und mit der erforderlichen Genauigkeit erfasst werden können. Die Ausgaben- bzw. Betriebsrechnungen, die von den öffentlichen Körperschaften erstellt werden, lassen wegen ihrer summarischen Kostenerfassung keine unseren Zwecken genügende Analyse zu. Eine Aufteilung nach Kostenstellen, welche den einzelnen Strassenabschnitten zu entsprechen hätten, wird nicht vorgenommen. Ebenso fehlen Angaben über die in Frage kommenden Schlüsselungsgrössen (z.B. Gewicht, Länge) und schliesslich ist auch die erbrachte Leistung, der Kostenträger, nicht zwangsläufig gegeben (z.B. Pers.km, Tonnen km, Anzahl Fahrzeuge usw.). Wir wollen daher im nächsten Abschnitt die zur Zeit verwendeten Zurechnungskriterien und Berechnungsmethoden etwas genauer analysieren.

322. Die Schweizerische Strassenrechnung

Sie wurde 1968 erstmals durch das Esta (424) veröffentlicht und 1976 durch eine Kategorienrechnung (Esta (578)) ergänzt. Während sich die ältere Publikation auf die Gegenüberstellung von Kosten und Erträgen beschränkt, gibt die Kategorienrechnung Kriterien an, mit denen die Gesamtkosten auf die einzelnen Motorfahrzeugkategorien geschlüsselt werden können. Es sind dies (Esta (578, S. 22)):

- Bruttotonnenkilometer (Verkehrsgewicht · jährliche Fahrleistung)
- Achslast Aequivalenz Faktoren (der Schädigung entsprechend gewichtete Achslast, bezogen auf Normachslast)
- Dauer der Strassenbenützung (jährliche Fahrleistung: durchschnittliche Reisegeschwindigkeit)

- Flächenkilometer {(Fahrzeuglänge + 0,208·v) · (Fahrzeugbreite + 1 m)}
- Fahrleistung pro Jahr

Die Unterhaltskosten werden beispielsweise zu einem Drittel gewichtsabhängig, zu zwei Dritteln fahrleistungsabhängig den einzelnen Motorfahrzeugkategorien zugerechnet. Die Fahrleistung gilt auch als Schlüsselungsgrösse für die Aufteilung der Verwaltungs- und Personalfürsorgeaufwendungen sowie der Kosten für Verkehrsregelung und -signalisation. Die übrigen Kriterien finden nur bei der Zurechnung der Investitionskosten Anwendung.

Die Strassenrechnung berücksichtigt nur die dem Motorfahrzeugverkehr zurechenbaren Kosten. Jene der Kantonsstrassen gehen beispielsweise nur zu 90 % in die Strassenrechnung ein, während die restlichen 10 % anderen Nutzungen (z.B. Fussgänger, als Leitungsträger für Wasserversorgung usw.) belastet werden.

Die Uebernahme der Ergebnisse, welche in der Kategorienrechnung ausgewiesen werden, ist problematisch: Sie sind als Mittelwert sehr unterschiedlicher Strassentypen und Verkehrsverhältnisse des gesamten schweizerischen Strassennetztes zu betrachten. Da auch die Zuteilungskriterien auf gesamtschweizerischen Mittelwerten beruhen, ist bei der Uebertragung der Zahlenwerte auf einen bestimmten Strassenabschnitt mit grossen Abweichungen zu rechnen.

Die einzelnen Kostenarten der Strassenrechnung, die wir im folgenden kurz streifen wollen, sind:

- Verwaltung und Personalfürsorge. Sie werden in erster Linie durch die Anzahl der zugelassenen Motorfahrzeuge sowie der Netzlänge beeinflusst.
- Winterdienst. In diese Kategorie fallen alle Aufwendungen für Schneeräumung, Salzen, das Aufstellen und Entfernen von Zusatzsignalen usw.

- Beseitigung von Frostschäden. Diese sind Folge ungenügender Oberbaudimensionierung, Verwendung frostempfindlicher Materialien oder unzureichender Entwässerung des Strassenkörpers.
- Belagserneuerung. Diese Kosten sind sehr eng mit der Verkehrsmenge verknüpft. Massgebende Grösse bei der Belagserneuerung ist die zulässige Rinnentiefe, die umso früher erreicht wird, je schmäler der Fahrstreifen ist. Verschleisserhöhend wirken nasse Fahrbahn, Brems- und Anfahrmanöver sowie Steigungen. Aus Untersuchungen von Sulger-Büel (1972) und Zipkes (1973) kann abgeleitet werden, dass pro Fahrzeugkilometer mit Belagserneuerungskosten von ca. 2 Rp./Fz.km (Preisbasis 1972/73) gerechnet werden kann.
- Bodenmarkierungen. Obwohl ein enger Zusammenhang mit der Verkehrsmenge vermutet werden kann, ist eine Abschätzung wegen mangelnder Unterlagen nicht möglich.
- Beleuchtungs- und Lichtsignalanlagen. Sie dienen in erster Linie der Erhöhung der Verkehrssicherheit und des Verkehrsflusses.
- Strassenreinigung. Sie ist bedingt durch den Reifen- und Belagsabrieb sowie die festen Abgasrückstände, aber auch durch verkehrsfremde Verunreinigungen.

Wie diese kurze Aufzählung zeigt, sind die meisten Kostenarten nicht einem Verkehrsmittel allein, sondern nur dem Verkehrssystem gesamthaft zurechenbar. Viele sind auch weitgehend mit Fixkostencharakter behaftet. Dies wird durch die Ergebnisse der Strassenrechnung für die Kriegsjahre bestätigt. Zwischen 1939 und 1945 sank der Eigenwirtschaftlichkeitsgrad von 100 % auf 15 %, bei einem Rückgang der Einnahmen von 91 auf 15 Mio. und, trotz sinkendem Verkehrsaufkommen, steigenden Kosten, deren Ursachen wir hier nicht diskutieren wollen.

323. Weitere Kostenzurechnungsprinzipien

Neben dem in der Strassenrechnung zur Anwendung gelangenden und hauptsächlich auf technischen Kriterien basierenden Benützungsprinzip werden in der Literatur zwei weitere Ansätze genannt.

Das Nutzenprinzip geht davon aus, dass durch die Benützung der Strassen ein Nutzen gestiftet wird. Die relative Nutzenziehung des einzelnen Benützers wird als Massstab für die Kostenzuteilung betrachtet (Sulger-Büel (1972 a)). Das Nutzenprinzip scheitert an der Messbarkeit des subjektiven Nutzens.

Das Kausalitäts- oder Verursachungsprinzip belastet dem Motorfahrzeugverkehr jene Kosten, die durch sein Aufkommen dem Strasseneigentümer gegenüber dem früheren, nicht motorisierten Verkehr zusätzlich erwachsen (Sulger-Büel (1972 a)). Dieses Prinzip wurde auch bei der Einführung der Schweizerischen Strassenrechnung in Erwägung gezogen. Es wurde abgelehnt, weil damit die mit der Strassenbenützung verbundenen Gemeinkosten nicht erfasst werden konnten (Esta (424, S. 20)).

Wir müssen feststellen, dass auch diese Prinzipien keine Kriterien enthalten, die unserer Problemstellung angemessen wären. Wir müssen deshalb auf relativ grobe, vereinfachende Annahmen abstellen, auf die wir im 4. Kapitel näher eingehen werden.

33. Zeitkosten

Der Faktor Zeit ist für unsere Problemstellung bedeutsam, weil die Zeitspanne, welche für die Ueberwindung einer bestimmten Strecke benötigt wird, vom gewählten Verkehrsmittel abhängig ist. Neben der Reisezeit sind dabei im Falle des öffentlichen Verkehrsmittels auch die Anmarsch-, Warte,- ev. Umsteige- und Gehzeit am Fahrtziel zu berücksichtigen. Bei Verwendung des individuellen Verkehrsmittels setzt sich die gesamte, pro Fahrt benötigte Zeit zusammen aus Anmarsch-, Reise-, Parkplatzsuch- und Gehzeit.

331. Begriff

Nach Pusch (1973, S. 33) kann der Zeitwert definiert werden als quantitativer, monetärer Ausdruck der Wertschätzung einer Zeiteinheit durch ein Wirtschaftssubjekt. Die Grössenordnung des Wertes leitet sich von den in dieser Spanne ablaufenden Tätigkeiten her. Die Zeitkosten können demnach interpretiert werden als mit dem tätigkeitsabhängigen Zeitwert bewerteter Zeitbedarf. Diese Definition geht davon aus, dass die einer Person zur Verfügung stehende Zeit ein knappes, unvermehrbares Gut darstellt, ohne jedoch unmittelbar zur Bedürfnisbefriedigung beizutragen. Ihre unabdingbare Verbundenheit mit jedem Produktions- und Konsumprozess verleiht der Zeit ökonomische Bedeutung, weil sie in jeder wirtschaftlich relevanten Aktivität als Komplementärgut auftritt. Zeit als solche ist demzufolge nicht bewertbar; erst die sich in ihr abspielenden Vorgänge machen sie zu einem knappen, nutzenstiftenden und damit ökonomisch relevanten Gut (Binder (1973, S. 3)).

Jeder Tätigkeit kann eine entsprechende Zeitkategorie zugeordnet werden. Folgen wir der in verkehrswirtschaftlichen Arbeiten üblichen Einteilung (Kentner (1972, S. 127)), so können den

wichtigsten Tätigkeitskategorien die nachstehend aufgeführten Zeitgruppen zugeordnet werden:

- Arbeitszeit (einschliesslich Fahrten während der Arbeitszeit)
- Besorgungszeit (Einkauf usw.)
- Zeit häuslicher Verrichtungen
- Freie Zeit
- Pendelzeit (ohne Fahrten während der Arbeitszeit)

Wir werden uns im wesentlichen auf die Diskussion der ersten und letzten Zeitgruppe beschränken, weil nur diese für unsere Fragestellung von Interesse sind.

332. Arbeitszeit

Die Bewertung der Arbeitszeit hat aus der Sicht des Unternehmers grundsätzlich von den Lohnsätzen auszugehen, die sich auf dem Arbeitsmarkt gemäss Angebot und Nachfrage bilden. Herrscht in allen Märkten vollkommene Konkurrenz, so wird der gewinnmaximierende Hersteller eines Gutes solange den Faktor Arbeit nachfragen, bis der Wert des Grenzproduktes dem Lohnsatz entspricht (Henderson (1973, S. 73)).

Kann der Arbeitnehmer die Arbeitszeit frei wählen und ist seine Nutzenfunktion nur vom Einkommen und der Freizeit abhängig, dann bietet er seine Arbeitskraft solange an, bis die Substitutionsrate des Einkommens für Freizeit dem Lohnsatz entspricht (Henderson (1973, S. 26)).

Obwohl diese Annahmen in Wirklichkeit nicht erfüllt sind, haben die theoretische und praktische Zeitwertforschung die Aussagen der Grenzproduktivitätstheorie übernommen und bewerten die Arbeitszeit mit dem Lohnsatz. Harrison (1969, S. 68) weist darauf hin, dass auch die nicht direkt im Lohnsatz ersichtlichen Son-

derleistungen, wie Gratifikationen, 13. Monatslohn usw., bei der Bewertung berücksichtigt werden müssen, weil diese ebenfalls im Wert des Grenzproduktes enthalten sind.

Korrekturen am Lohnsatz drängen sich nach Pusch (1973, S. 66) in all jenen Fällen auf, wo eine makroökonomische Betrachtungsweise Wohlstandsverluste aufzudecken vermag, die mikroökonomisch nicht wahrnehmbar sind (z.B. verkehrsbedingte Entleerungsgebiete). Da wir nur den Personenverkehr in der Morgen- und Abendspitzenstunde diskutieren und Fahrten während der Arbeitszeit nur untergeordnete Bedeutung zukommt, verzichten wir auf diese - äusserst schwierig quantifizierbaren - Korrekturen.

333. Nichtarbeitszeit

Erheblich schwieriger ist die Bestimmung des Zeitwertes für Aktivitäten, die sich ausserhalb der Arbeitszeit abspielen. Diese Tätigkeiten sind nutzenorientiert, vollziehen sich in der Individualsphäre der Wirtschaftssubjekte, sind einer Marktordnung nicht zugänglich und damit auch nicht mit Faktorpreisen bewertbar. Wir sind deshalb auf Zeitwerte angewiesen, welche sich auf die subjektive Einschätzung der Tätigkeiten abstützen, die sich in der betrachteten Zeitperiode vollziehen. Als wichtigste Faktoren, welche die individuelle Zeitwertentscheidung determinieren, können genannt werden:

- Einkommen: Es stellt mit der Budgetbeschränkung eine wesentliche Bestimmungsgrösse des nutzenmaximierenden Güterbündels dar. Pusch (1973, S.73) misst dabei der entscheidungsbezogenen Abgrenzung des Einkommensbegriffes grosse Bedeutung zu (indviduelles oder Haushaltseinkommen), ebenso der Länge der einkommensrelevanten Budgetperiode, dem Grenznutzen des Einkommens und der Kaufkraft des Geldes. Da angenommen werden kann, dass der Grenznutzen mit zunehmendem Einkommen fällt, muss die Aussagefähigkeit reiner Einkommensgrössen stark relativiert werden.

- Zeitbudget: Wie wir zu Beginn dieses Abschnittes bereits festgestellt haben, ist die Zeit ein knappes Gut und nicht substituierbar. Bei der Zuordnung der einzelnen Aktivitäten auf die insgesamt zur Verfügung stehende Zeit werden also auch einkommensunabhängige Faktoren eine Rolle spielen. Mit anderen Worten: Ist das Einkommen der Engpassfaktor und die Zeit nicht, so werden zeitextensive Tätigkeiten bevorzugt und der Zeitwert sinkt; ist hingegen die Zeit relativ zum Einkommen knapp, so werden zeitintensive Aktivitäten überwiegen (z.B. Wahl des teureren aber dafür schnelleren Verkehrsmittels), und der Zeitwert steigt.

- Psychologische Einflüsse: Diesem Faktor kommt vor allem dann grosse Bedeutung zu, wenn Zeitwerte aus der Zahlungsbereitschaft von Individuen abgeleitet werden. Die Wahrnehmung und Schätzung der Zeitdauer unterliegt nämlich auch psychologischen Einflüssen; je interessanter eine Aktivität ist, desto kürzer wird deren Dauer beurteilt und umgekehrt. Wenn aufgrund empirischer Untersuchungen eine höhere Gewichtung von Warte- und Gehzeiten gefordert wird (z.B. Harrison (1969, S. 76)), so ist die Ursache wahrscheinlich auch in der Gleichsetzung von objektiver (messbarer) und subjektiv empfundener Personenzeit zu suchen.

334. Ansätze zur Zeitbewertung

Im folgenden wollen wir die wichtigsten Modelle, welche methodisch unterschiedliche Ansatzpunkte zur Zeitbewertung enthalten, kurz vorstellen. Da sich bei der Bewertung der Arbeitszeit in dieser Beziehung keine besonderen Probleme stellen, wollen wir uns hauptsächlich auf jene Ansätze beschränken, welche sich mit der Bewertung der Freizeit, insbesondere der Pendelzeit, befassen.

3341. Nutzentheoretische Ansätze

Die Ansätze wurzeln in der mikroökonomischen Haushaltstheorie. Im einfachsten Fall wird der Nutzen des Individuums durch Aufteilung der Zeit in Arbeits- und Freizeit maximiert (Pusch (1973, S. 106)), wobei die Budgetbeschränkung durch das während der Arbeitszeit erzielbare Einkommen gegeben ist und Arbeits- sowie Freizeit zusammen die Periodendauer nicht überschreiten dürfen. Aus dieser Betrachtung ergibt sich eine Bewertung der unmittelbar an die Arbeitszeit anschliessenden Tätigkeiten zum Lohnsatz.

Entscheidende Impulse für die theoretische Zeitwertanalyse gingen von der Arbeit Beckers (1965) aus, die von Evans (1972) aufgegriffen und weiterentwickelt wurde. Beide Arbeiten haben durch den Einbezug weiterer Bestimmungsgrössen in die Nutzenfunktion zwar zu einer realitätsnäheren Orientierung dieser Modelle geführt. Eine direkte Anwendung in empirischen Untersuchungen scheiterte bisher an der Quantifizierung der Nutzenfunktion.

3342. Verhaltensorientierte Ansätze

Diese Modelle gehen von der Zahlungsbereitschaft aus. Es wird unterstellt, dass das Verhalten der Wirtschaftssubjekte bei fahrtbezogenen Entscheidungen auf der Maximierung des individuellen Nutzens beruht. Ausgangspunkt der Untersuchung sind nach Binder (1973, S. 93) Situationen, wo das Individuum die Möglichkeit hat, Zeitersparnisse gegen andere, in Geldeinheiten bewertbare Eigenschaften eines Verkehrs- oder Transportablaufs zu substituieren. Damit ist auch der grosse Streubereich, der sich bei Anwendung dieser Modelle ergibt, erklärbar. Er leitet sich aus der Tatsache ab, dass die Präferenzen der einzelnen Verkehrsteilnehmer nicht identisch sind.

Je nach beobachteter Wahlmöglichkeit lassen sich die Verhaltensmodelle in drei Gruppen einteilen: Methoden der Geschwindigkeitswahl, der Routenwahl und der Verkehrsmittelwahl. Alle drei setzen nach Harrison (1969, S. 35) voraus, dass

- eine echte Wahlsituation gegeben ist
- alle Verkehrsteilnehmer die zur Wahl stehenden Möglichkeiten genau kennen; insbesondere aber auch, dass sie über die für den Entscheid relevanten Kriterien informiert sind
- alle erklärenden Variablen richtig erfasst werden
- die Alternativen wahrnehmbare Unterschiede bei den untersuchten Grössen aufweisen.

- Die Methode der Geschwindigkeitswahl geht von der Annahme aus, dass der Fahrer die Betriebskosten seines Fahrzeuges genau kennt. Die Geschwindigkeit muss in einem grossen Bereich frei wählbar sein. Der "trade-off" erfolgt im Modell zwischen Kosten der Fahrzeit und geschwindigkeitsabhängigen Betriebskosten, wobei unterstellt wird, dass der Fahrer diese Grössen durch Geschwindigkeitsvariation so lange substituiert, bis seine Gesamtkosten ein Minimum erreichen. Die Annahmen, die diesem Ansatz zugrunde liegen, sind äusserst restriktiv. Die Schwierigkeiten, denen wir in Abschnitt 31 begegnet sind, um die Betriebskosten der Verkehrsmittel in Abhängigkeit von der Reisegeschwindigkeit zu bestimmen, lassen berechtigte Zweifel aufkommen, dass der einzelne Fahrzeugbenützer über mehr als grobe Kostenvorstellungen verfügt. Zudem ist der Wahlbereich vielfach eingeschränkt oder durch technische Bedinungen begrenzt: Maximalgeschwindigkeit des Fahrzeugs, Behinderungen durch andere Verkehrsteilnehmer, vorgeschriebene Höchstgeschwindigkeit. Es ist unwahrscheinlich, dass Zeitwerte, welche mit Hilfe von Geschwindigkeitswahl-Modellen berechnet werden, die Zahlungsbereitschaft des Fahrers widerspiegeln.

- Bei Modellen der Routenwahl sind zwischen Fahrtquelle und Bestimmungsort mehrere Verbindungen vorhanden, aus denen das Individuum wählen kann und zwischen denen Wahlmöglichkeiten folgender Art bestehen:

  - Wahl zwischen einer längeren, aber schnelleren Verbindung oder einer kürzeren, dafür langsameren Strecke (z.B. Autobahn - Landstrasse)

  - Wahl zwischen einer schnelleren, gebührenpflichtigen Strecke oder einer langsameren, dafür gebührenfreien Relation (z.B. gebührenpflichtiger Tunnel - Passstrasse)

  Beide Wahlmöglichkeiten setzen voraus, dass die Fahrer die alternativen Verbindungen kennen, über Fahrzeit, Betriebskosten und Gebühren informiert sind und ihren Entscheid in bezug auf die Substitution zwischen Zeit- und Kostengrössen rational fällen. Bei der empirischen Arbeit stellen sich zudem Probleme statistischer Art (Kollinearität), welche die Signifikanz der Ergebnisse in Frage stellen. Auf diese Fragen wollen wir hier nicht eingehen.

- Die Verkehrsmittelwahl- unterscheidet sich von der Routenwahlmethode dadurch, dass sich die Wahlsituation statt auf Verkehrswege auf Verkehrsmittel bezieht: Einem langsameren und billigeren steht ein schnelleres, aber auch teureres Verkehrsmittel gegenüber. Der Zeitwert leitet sich wiederum aus den Kosten- und Zeitdifferenzen der beiden Alternativen ab. Die Schwierigkeiten, denen sich die empirische Arbeit gegenübergestellt sieht, sind jenen bei der Routenwahl besprochenen sehr ähnlich.

3343. Sozialpsychologische Ansätze

Die verhaltensorientierten Ansätze versuchen, aus den offenbarten Präferenzen der Individuen ex post einen Zeitwert abzuleiten. Neben den grundsätzlichen Mängeln sowie den Proble-

men bei der Datenbearbeitung gaben vor allem die Existenz individueller Wahrnehmungsunterschiede, Prestigekomponenten, Einflüsse aus Tradition und Gewohnheit den Ausschlag zur Entwicklung von Interview- und Simulationsmethoden, welche die Wahlentscheidungen der Verkehrsteilnehmer einer umfassenderen Analyse zugänglich machen sollten. Aus den Entscheidungen der Testteilnehmer werden direkt die Präferenzen in einer Rangfolge dargestellt und über das Verhältnis des von den Testpersonen gewünschten Zeitgewinns sowie der gewünschten ständigen Fahrpreisreduzierung wird ein Zeitwert abgeleitet. Allerdings ist dieser Ansatz noch nicht über das Versuchsstadium hinausgekommen, und bisher sind unseres Wissens auch keine Zeitwerte bekanntgegeben worden. Eine ausführliche Diskussion dieses Ansatzes findet sich in Geiger (1971, S. 262).

335. Empirische Untersuchungen

Eine der bekanntesten, auf der Methode der Verkehrsmittelwahl beruhende Untersuchung zur Bestimmung der Zeitwerte der Pendler stammt von Beesley (1965), welcher Angestellte des britischen Transportministeriums befragte. Dabei ging er von der Voraussetzung aus, dass die Befragten jenes Verkehrsmittel benützen, welches den mit der Reise verbundenen Nutzenverlust minimiert. Weiter nahm Beesley an, dass alle in der gleichen Lohnklasse eingestuften Mitarbeiter über dasselbe Einkommen verfügen und sich die Entscheidungssituation lediglich auf Reisezeit- und Fahrpreisunterschiede bezieht. Mit anderen Worten: Die Reisenden verhalten sich gegenüber Verkehrsmitteln indifferent, solange der durch Reisezeit und Fahrpreise (bzw. Kosten) gebildete Nutzen gleich ist. Der Zeitwert wird aus Befragungsergebnissen abgeleitet, indem die Zeit- und Kostenunterschiede in einem Koordinatensystem aufgetragen werden und der Zeitwert so bestimmt wird, dass die "Fehlentscheide" minimal sind. Die daraus abgeleiteten Zeitwerte schwanken,

je nach Einkommenskategorie, zwischen 30 % und 50 % des Lohnsatzes.

Quarmby (1967) befrage die Beschäftigten von 40 Firmen in Leeds nach ihrem Verkehrsverhalten und ihrer Wahl zwischen Personenwagen und Bus oder PW und Zug. Mit diesem Datenmaterial berechnete er den Zeitwert mit Hilfe von statistischen Modellen, indem er die Differenzen und Quotienten der Koeffizienten erklärender Variabler bestimmte. Für verschiedene Einkommensgruppen resultierten Zeitwerte, die ca. 25 % des Bruttolohnsatzes ausmachen. Zudem weist er unterschiedlich hohe Zeitwerte für Fahrten in individuellen und öffentlichen Verkehrsmitteln aus, die aber wegen der Autokorrelation unter den erklärenden Variablen statistisch nicht als gesichert angesehen werden können. Eine Auswertung nach Reiselänge ergab erst ab Distanzen von ca. 6 km signifikante Zeitwerte. Aehnliche Aussagen leitet Heggie (1976, S. 46) aus Daten ab, die bei einer Befragung von Pendlern in Vancouver gewonnen wurden. Er stellt fest, dass die Zeitwerte sowohl von der gesamten für die Fahrt benötigten Zeit als auch von dem durch unterschiedliche Verkehrsmittelwahl möglichen Zeitgewinn abhängig sind. Auch das Fahrtziel (Wohnung, Arbeitsplatz) scheint die Höhe des Zeitwertes zu beeinflussen, obwohl keine statistisch gesicherten Resultate vorliegen.

Über Zeitwerte, die von einem Routenwahlmodell abgeleitet wurden, berichtet Thomas (1968), der für Zeitersparnisse grösser als 10 Minuten und Reiselängen über 8 km einen Wert erhält, der ca. 60 % des Stundenlohnes erreicht. Da die Untersuchung in erster Linie auf die Eichung jener Parameter ausgerichtet ist, welche die Entscheidung über die Routenwahl beeinflussen können (Einkommen, Geschlecht usw.), fallen diese Zeitwerte mehr als Nebenprodukt seiner Untersuchung an. In einer ergänzenden Arbeit überprüfte Thomas (1971) die Zeitwerte auf einer erweiterten Datenbasis und zeigte, dass diese je nach Einkom-

menshöhe und Fahrtzweck unterschiedlich hoch sind und von der Grösse des Zeitgewinnes abhängen. Zeitdifferenzen unter fünf Minuten pro Fahrt wurden im Pendlerverkehr sehr tief, solche über 20 Minuten etwa konstant bewertet, während der Zeitwert zwischen diesen Grenzen nach einem linearen Anstieg wieder abfällt (Thomas (1971, S. 115)).

336. Folgerungen

Die Diskussion der Bewertungsansätze hat gezeigt, dass aufgrund des heutigen Erkenntnisstandes weder theoretische noch empirische Ergebnisse vorliegen, die allgemeingültige Zeitwerte für den Pendelverkehr abgeben. Bei den theoretischen, von der Nutzentheorie ausgehenden Modellen besteht die Schwierigkeit, Nutzenfunktionen quantitativ darstellen zu können. Die verhaltensorientierten Methoden sehen sich der Problematik ausgesetzt, alle relevanten Variablen zu erfassen: Werden möglichst viele entscheidungsbezogene Grössen in das Modell einbezogen, so ergeben sich bei der statistischen Auswertung Multikollinearitäten, die sich auf das Signifikanzniveau der Ergebnisse auswirken; beschränkt sich die Untersuchung auf wenige erklärende Variable, so werden die Zeitwerte verfälscht, weil sie auch den Einfluss der unberücksichtigt gebliebenen Parameter implizit enthalten. Wie Hensher (1977) zeigt, fällt der Zeitwert nämlich in der Mehrzahl der getesteten Modelle als Schätzgrösse für die Erklärung der Verkehrsnachfrage oder der Verkehrsmittelwahl an. In Tabelle 3.2 sind zur Veranschaulichung des Streubereichs die Ergebnisse einiger Untersuchungen für den Zeitwert der Pendler aufgeführt.

Tabelle 3.2: Resultierende Zeitwerte in % des Lohnsatzes für einige empirische Untersuchungen des Zeitwertes im Pendlerverkehr

Land	Jahr der Datenerhebung	Autor	Zeitwert in % des Lohnsatzes
Frankreich	1961	Merlin	75
England	1963	Beesley	31 - 49
England	1964	Quarmby	20 - 25
Amerika	1964	Lisco	52
England	1964	Barnett	14 - 33
Norwegen	1964	Hansen	26
England	1965	Stopher	42 - 52
England	1967	Beesley	30 - 62
England	1967	Lee	29 - 37
England	1967	-	53
Italien	1970	Dawson	70

Quellen: Hensher (1974), Plath (1977)

Resultate weiterer empirischer Arbeiten werden in Heggie (1976, S. 135) und Goodwin (1976, S. 49) diskutiert. Die dort vorgestellten Zeitwerte liegen in der Mehrzahl zwischen 20 und 50 % des Lohnsatzes.

Wir kommen zum Schluss, dass die Berechnung der Zeitkosten mit einem einzigen Zeitwert nicht sinnvoll ist. Deshalb wollen wir im 4. Kapitel die Zeitkosten sowie deren Einfluss auf die optimale Verkehrsteilung mit unterschiedlichen Zeitwerten berechnen.

34. Unfallfolgekosten

Bei der Bestimmung des kostenminimalen Modal Splits, d.h. der Aufteilung der Verkehrsleistung auf die Verkehrsmittel Personenwagen und Bus, sind auch die Kosten zu berücksichtigen, welche im Zusammenhang und als Folge von Unfällen entstehen. Dazu müssen zwei Fragen beantwortet werden: Wie gross sind Unfallhäufigkeit und -schwere je Verkehrsmittel einerseits und welche Kosten entstehen in Abhängigkeit von diesen Grössen andererseits?

341. Die Erfassung des Unfallgeschehens

Ballmer (1975, S. 23) definiert den Strassenverkehrsunfall als "ein plötzliches, unbeabsichtigtes Ereignis auf öffentlicher Strasse oder öffentlichem Platz, bei dem mindestens ein in Bewegung befindliches Verkehrsmittel beteiligt ist, und das zur Tötung oder Verletzung eines Menschen oder zu einer nicht völlig belanglosen Sachbeschädigung führt". Das Unfallgeschehen ist das Ergebnis vielfältiger, situationsbedingter Wechselwirkungen zwischen den Elementen Mensch, Fahrzeug, Fahrbahn, Umwelt usw. Trotz vielfältiger, auch interdisziplinärer Bemühungen ist es bis heute nicht gelungen, das Unfallgeschehen systematisch zu erfassen. Dies liegt nicht allein in der Komplexität der Aufgabe begründet; die grossen Informationslücken bei der Unfallanalyse und die sehr beschränkte Reproduzierbarkeit von Unfallsituationen gestatten es nicht, allgemeingültige Aussagen zu machen. Wenn nachstehend versucht wird, die wichtigsten Bestimmungsgrössen zu diskutieren und deren Einfluss auf das Unfallgeschehen aufzuzeigen, so geschieht dies in erster Linie zur Formulierung eines gangbaren Lösungsweges, wie die Unfallfolgekosten in erster Näherung bestimmt werden können.

3411. Die amtlichen Statistiken

Informationen über das Unfallgeschehen auf dem schweizerischen Strassennetz werden jährlich vom Eidgenössischen Statistischen Amt veröffentlicht. Sie bauen auf den Meldungen der kantonalen Polizeistellen auf und umfassen alle polizeilich registrierten Unfälle, die zu Sachschäden oder zur Verletzung von Personen führten. Werden amtliche Statistiken zur Bestimmung von Unfallhäufigkeiten herangezogen, so ist mit einer Dunkelziffer zu rechnen, deren Ausmass mit sinkender Unfallschwere zunimmt. Dies gilt nicht nur für reine Sachschäden, welche vielfach aus versicherungstechnischen Gründen direkt unter den Beteiligten geregelt werden, sondern auch für Personenschäden. Während die Erfassung von Schwerverletzten, zu denen nach Esta (575, S. 8) alle Personen gezählt werden, die Brüche, Hirnerschütterungen, innere Verletzungen oder schwere Riss- und Quetschwunden erleiden, als vollständig vorausgesetzt werden kann, sind bei den Leichtverletzten grosse Vorbehalte anzubringen. Ausgehend von der SUVA-Statistik schätzt Ballmer (1975, S. 125) die Zahl der bei Strassenverkehrsunfällen Verunfallten auf 74'000, während die offizielle Statistik (Esta (528, S. 47)) für 1972 nur 18'216 Leichtverletzte ausweist. Diese Diskrepanz ist nicht allein durch Schätzfehler erklärbar. Daher muss angenommen werden, dass die Dunkelziffer auch für Unfälle mit Leichtverletzten hoch ist.

Schätzungen über den Anteil polizeilich registrierter Unfälle werden in Pfundt (1969, S. 2) aufgeführt. Die Auswertung einer in Schweden durchgeführten Haushaltsbefragung ergab, dass nur jeder siebte Unfall mit Sachschaden und etwa jeder zweite Unfall mit Personenschaden polizeilich registriert wurde.

Weitere Vorbehalte bei der Analyse amtlicher Statistiken sind nach Schwerdtfeger (1973, S. 144) zu machen, wenn dieses Material zur Prognose von Unfallhäufigkeiten verwendet werden soll,

weil die Polizeistellen seiner Meinung nach die Unfallaufnahme in der Regel auf die Ermittlung des juristisch Schuldigen ausrichten, während räumliche und zeitliche Umgebung nur am Rande berücksichtigt werden (Konzept der menschlichen Verursachung).

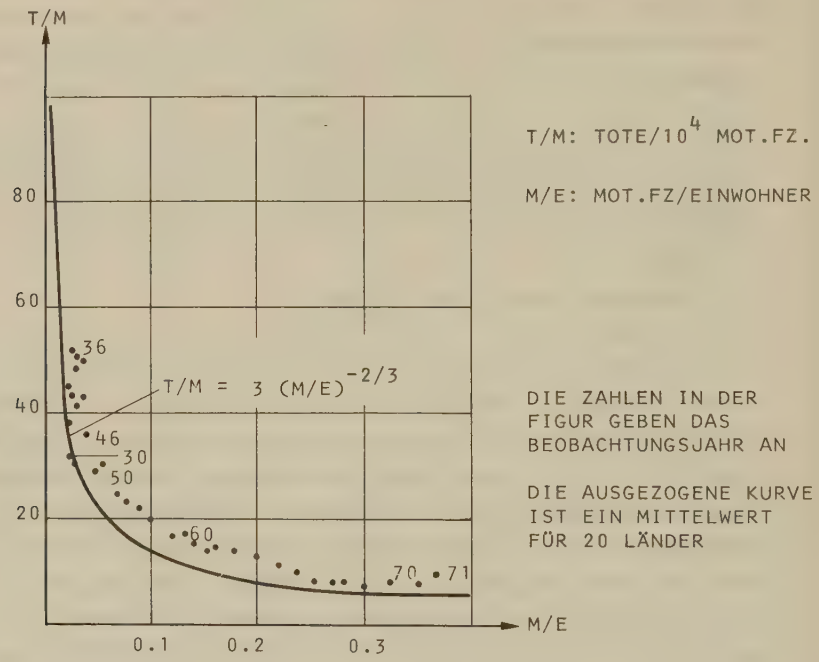
Trotz dieser Einschränkungen besitzen die amtlichen Unfallstatistiken eine wertvolle Hinweisfunktion, sofern bei ihrer Interpretation die erwähnten Vorbehalte berücksichtigt werden.

3412. Die Analyse von Zeitreihen

Auch die zeitliche Entwicklung des Unfallgeschehens muss, da andere Unterlagen kaum verfügbar sind, mit Hilfe der erwähnten Statistiken verfolgt werden. Selbst wenn die Unfallaufnahmeverfahren während der Untersuchungsperiode nicht verändert werden, ist die Vergleichbarkeit der Daten durch andere Faktoren beeinträchtigt. Als Beispiele können genannt werden: Sanierung von Gefahrenstellen, Bau von Umfahrungsstrassen, Verkehrsregelung durch Lichtsignalanlagen. Diese Massnahmen wirken sich auf die Unfallhäufigkeit aus, auch wenn die Verkehrsmenge im Beobachtungszeitraum konstant bleibt. Aehnliche Einflüsse gehen von Geschwindigkeitsbeschränkungen oder der Gurtentragpflicht aus, langfristig sind auch Massnahmen im Fahrzeugbau wirksam.

Interessante und für die Entwicklung des Unfallgeschehens aufschlussreiche Zeitreihen wurden von Smeed (1974) erarbeitet. Er verglich für verschiedene Länder die zeitliche Abhängigkeit der Strassenverkehrstoten pro 10'000 Motorfahrzeuge vom Motorisierungsgrad und erhält Kurvenverläufe, die jenem in Abbildung 3.4 für die Schweiz dargestellten entsprechen.

Abbildung 3.4: Zusammenhang zwischen Strassenverkehrstoten pro 10 000 Motorfahrzeuge und dem Motorisierungsgrad



Quelle: Smeed (1974)

Man stellt fest, dass die Anzahl der tödlich Verunglückten mit zunehmender Motorisierung sinkt. Smeed (1974) führt diese Entwicklung darauf zurück, dass das Ueberschreiten gewisser "Reizschwellen" die Realisierung von Massnahmen beschleunigt, welche das Risiko dieser Unfallart vermindern. Dathé (1969), der in einer Querschnittsuntersuchung für die Jahre 1964 bis 1966 zu ähnlichen Ergebnissen gelangt wie Smeed, führt die Abnahme des relativen Todesrisikos auf die zunehmende Verkehrsdichte, den sinkenden Fussgänger- und Radfahreranteil sowie das bessere Verkehrsklima zurück.

Diese sehr globale Analyse lässt natürlich keine differenzierten Aussagen über das Unfallgeschehen zu. Dennoch macht sie - zumindest für die Unfalltoten - deutlich, wo die Grenzen der Zeitreihenanalyse liegen, sofern die zeitabhängigen Variablen nicht getrennt erfasst werden können.

3413. Empirische Untersuchungen

Ziel der Unfallanalyse ist, die Auswirkungen verschiedenster Parameter auf das Unallgeschehen zu quantifizieren. Dabei werden Kennziffern verwendet, welche die absoluten Unfallzahlen entweder zur Strassenlänge (→ Unfalldichte) oder zur Fahrleistung (→ Unfallrate) in Beziehung setzen. Die Unfallrate gibt an, wie viele Unfälle sich pro 1 Mio. Fahrzeugkilometer ereignen, die Unfalldichte wird in der Regel als Zahl der Unfälle pro Strassenkilometer und Jahr gemessen. Die Unfallrate kann weiter aufgeteilt werden; die daraus abgeleitete Unfallcharakteristik gibt dann die Verteilung der Unfallrate auf verschiedene Unfalltypen, wie Fahrunfälle, Unfälle beim Einbiegen oder Kreuzen usw., an (Pfundt (1969, S. 15)).

Nachstehend werden die wichtigsten empirischen Ergebnisse, welche den Einfluss einer oder mehrerer Variablen auf die Unfallhäufigkeit aufzuzeigen versuchen, kurz gestreift. Da viele dieser Arbeiten auf amtlichen Statistiken aufbauen, unterliegen auch die Ergebnisse den erwähnten Vorbehalten.

- Verkehrsmenge. Eine der verbreitetsten Methoden bei empirischen Untersuchungen besteht darin, die Zahl der Unfälle, welche sich auf einem bestimmten Strassenabschnitt während einer festgelegten Zeitspanne ereigneten, direkt mit der entsprechenden Verkehrsmenge ins Verhältnis zu setzen. Nach Pucher (1963, S. 36) nimmt die Unfallrate zuerst mit steigender Verkehrsmenge zu, sinkt aber bei hoher wieder ab. Seine Untersuchungen beruhen auf Verkehrsmengenklassen, die

aufgrund des durchschnittlichen täglichen Verkehrs (DTV) gebildet wurden. Dadurch fallen beispielsweise Strassenabschnitte mit einer konstanten Verkehrsbelastung in die gleiche Klasse wie solche mit ausgeprägter Sptizenbelastung und gleichem DTV. Pfundt (1969, S. 42) erhält bei der Auswertung von Landstrassenunfällen eine mit zunehmendem DTV sinkende Unfallrate. Untersuchungen von Gwynn (1967, S. 407) auf der Basis stündlicher Verkehrsmengen ergeben für eine amerikanische Hochleistungsstrasse einen u-förmigen Kurvenverlauf; zu ähnlichen Ergebnissen kommt Leutzbach (1970, S. 204) bei der Analyse von Autobahnunfällen bei Tageslicht. Den steigenden Ast führt er auf den überproportionalen Anstieg der Auffahrtskollisionen zurück. Wie weit diese Ergebnisse auf die uns interessierenden Verhältnisse übertragbar sind, müsste durch Versuche überprüft werden.

- Verkehrsmittel. Legat (1968, S. 223), der die Unfallraten in der BRD für das Jahr 1966 ermittelte, kam zu folgenden Ergebnissen: Bezogen auf eine Fahrleistung von 1 Mio. Fahrzeugkilometern war die Rate für Unfälle mit Personen- und schwerem Sachschaden am höchsten bei den Strassenbahnen, gefolgt von motorisierten Zweirädern, Omnibussen, Personen- sowie Liefer- und Lastwagen. Bezogen auf die Verkehrsleistung (in Personenkilometern) lautet die Reihenfolge motorisierte Zweiräder, Personenwagen, Strassenbahnen, Omnibusse. Diese Reihenfolge beruht allerdings auf Werten für die gesamte BRD und lässt sich nicht ohne weiteres auf städtische Gebiete übertragen.

- Fahrbahnbreite. Während Spary (1968, S. 179) eine sinkende Unfallrate mit zunehmender Fahrbahnbreite ausweist, erhält Pucher (1963, S. 28) keine signifikanten Ergebnisse. Seiner Meinung nach sind Aussagen nur möglich, wenn weitere Variable (z.B. Kurvenradien) berücksichtigt werden.

- Verkehrsmischung. Die gleichzeitige Benützung desselben Verkehrsträgers durch verschiedene Verkehrsmittel und Fussgänger stellt eine zusätzliche Quelle von Konfliktmöglichkeiten dar, die zwar in den Unfallzahlen zum Ausdruck kommt, für die zur Zeit aber keine Aussagen über das Unfallrisiko gemacht werden können.

- Tageszeit. Die stündliche Verteilung der Verkehrsunfälle zeigt deutliche Spitzen, die mit dem grössten Verkehrsanfall übereinstimmen (AfVZ (1975, S. 9)). Neben der hohen Verkehrsbelastung werden für die überdurchschnittliche Unfallhäufigkeit am Abend auch medizinische Gründe verantwortlich gemacht (Müdigkeit, tiefer Blutzuckerspiegel). Nicht zu vernachlässigen sind die Lichtverhältnisse. Ihr Einfluss macht sich bei allen Unfallarten bemerkbar. Beispielsweise starben von den 1969 - 1973 getöteten Fussgängern in der Stadt Zürich (total 194) 37 % bei Dunkelheit und 11 % in der Dämmerung (SASZ (1975, S. 14)).

- Witterung. Pfundt (1970, S. 196) stellte, gemessen am Mittelwert für alle Unfalltypen, bei Nässe einen überproportionalen Anteil von Fahrunfällen auf Landstrassen fest, während Unfälle im Zusammenhang mit kreuzendem und abbiegendem Verkehr relativ selten waren. Ungünstigste Kombination war das gleichzeitige Eintreffen der Merkmale Dunkelheit und nasse Fahrbahn, die 48 % aller Nachtunfälle auf sich vereinte, während der Anteil bei Helligkeit 35 % betrug.

Die Diskussion einiger Einflussfaktoren auf das Unfallgeschehen hat gezeigt, dass der heutige Kenntnisstand keine genauen Aussagen über Unfallrate und Unfallcharakteristik im Stadtverkehr zulässt. Wir werden im 4. Kapitel versuchen, Schätzungen der Unfallraten für den individuellen und öffentlichen Verkehr zu machen, die unseren Bedürfnissen einigermassen gerecht werden.

342. Die Bewertung der Unfallfolgen

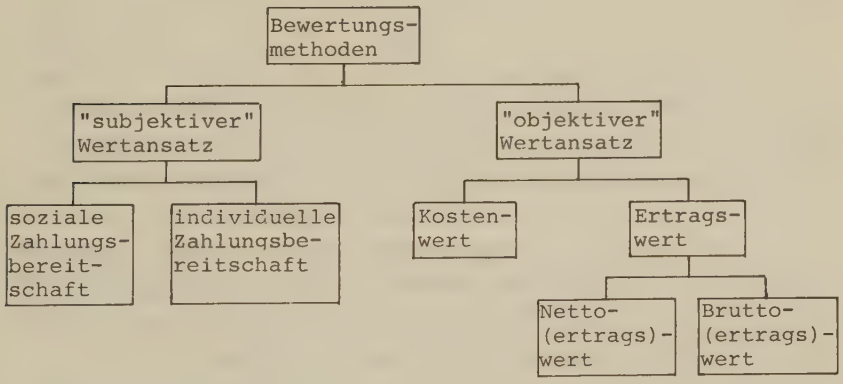
Um das in Abschnitt 341 beschriebene und noch zu quantifizierende Unfallgeschehen in Geldgrössen ausdrücken zu können, müssen die Unfallfolgen monetär bewertet werden. Diese Aufgabe stellt einen Schwerpunkt verkehrswirtschaftlicher Arbeit dar; die bekanntesten Lösungsvorschläge unterscheiden sich vor allem in der Bewertung des menschlichen Lebens sowie der Annahmen über die Höhe gesamtwirtschaftlicher Auswirkungen. Während einige Autoren jede monetäre Bewertung menschlichen Lebens ablehnen und damit den intangiblen Kosten zuordnen sind andere der Auffassung, dass zumindest ein Teil der Folgen, die durch den Tod eines Verkehrsteilnehmers entstehen, monetär erfassbar sind.

Weitgehende Uebereinstimmung ist vorhanden, solange es um die Bewertung von Sachgütern, wie Fahrzeuge, transportierte Güter, Transportanlagen usw., geht. Hier können die Reparaturkosten (= Instandstellungskosten) bzw. der Wiederbeschaffungswert vollständig zerstörter Güter als Bewertungsmassstab verwendet werden, der auf Marktpreisen beruht und damit den Bewertungsspielraum stark einengt. Auch die Aufwendungen zur Heilung von Leicht- und Schwerverletzten sowie der im Spital Verstorbenen lassen sich aus den Betriebsstatistiken der Heilanstalten relativ genau bestimmen. Dasselbe gilt für die Aufwendungen im Ausgleichsprozess, zu denen nach Ballmer (1975, S. 27) die Kosten für Polizei, Gerichte und Anwälte sowie die Verwaltungskosten der Versicherungsunternehmen gezählt werden.

Hingegen entzieht sich das menschliche Leben einer Bewertung durch Wiederbeschaffungskosten oder monetarisierte Güter- und Dienstleistungsabgänge. Aehnliches gilt für die Schmerzen, welche die Verletzten erleiden, die Einbusse an Lebensfreude bei Invaliden mit Dauerschäden sowie den Verlust, den die Familie und die Gesellschaft durch den Unfalltod eines Mitgliedes erleiden.

Ein wohlfahrtsökonomisch orientiertes Konzept für die Bewertung menschlichen Lebens wird von Mishan (1975, S. 303) vorgeschlagen. Er unterscheidet vier mögliche Risiken, deren Aenderung bei den Betroffenen zu einer Variation des Wohlstandsniveaus führt. Diese versucht er mit den in Abschnitt 223 diskutierten Kompensationszahlungen zu erfassen. Sie entsprechen jenen Geldbeträgen, welche den Betroffenen bezahlt werden müssten, um das ursprüngliche Wohlstandsniveau beibehalten zu können. Eine Realisierung dieses theoretisch fundierten Konzeptes scheint jedoch zur Zeit nicht möglich.

Die üblicherweise verwendeten Methoden zur Ermittlung von Wertansätzen für die Bewertung menschlichen Lebens sind nicht werturteilsfrei, da sie bestimmte Zielsetzungen implizieren. Nach Kentner (1972 a, S. 642) lassen sich diese Ansätze wie folgt gliedern.



Die "subjektiven" Wertansätze richten sich an die individuelle oder soziale Zahlungsbereitschaft (willingness to pay). Dabei wird versucht, jene Geldbeträge zu ermitteln, die der Einzelne oder die Gesellschaft zu leisten bereit sind, um einen Todesfall zu verhindern oder die Wahrscheinlichkeit seines Eintritts herabzusetzen. Sofern die Zahlungsbereitschaft richtig erfasst

werden kann, entsprechen die resultierenden Werte den von Mishan vorgeschlagenen Kompensationszahlungen. Dies trifft in der Regel für implizit abgeleitete Werte, d.h. Grössen, die beispielsweise aus realisierten Massnahmen zur Unfallverhütung berechnet werden, nicht zu: sie sind abhängig von den Zielsetzungen, welche mit der entsprechenden Massnahme angestrebt werden sowie den zur Verfügung stehenden Technologien und dem Ausmass der angestrebten Risikosenkung. Beispiele solcher Massnahmen sind die Risikominderung durch Gurtentragpflicht, die Beleuchtung von Strassenabschnitten, gerichtlich verfügte Schmerzensgeldzahlungen usw. Melinek (1974, S. 103) gibt Beispiele für die implizite Ermittlung von Wertansätzen mit Hilfe der individuellen Zahlungsbereitschaft, indem er mögliche Handlungsalternativen des Individuums betrachtet, z.B. erhöhtes Todesrisiko von Rauchern, verglichen mit Nichtrauchern usw. Die von ihm berechneten Werte sind wegen der erwähnten methodischen Mängel aber als ebenso willkürlich einzustufen wie solche, die mit "objektiven" Bewertungsmethoden erzielt werden.

Die "objektiven" Wertansätze werden aus Geldgrössen berechnet, die mit dem untersuchten Tatbestand in Verbindung gebracht werden können. Der Kostenwert wird zur Bewertung des Lebens von Personen verwendet, die vor Erreichen der Erwerbstätigkeit tödlich verunglücken. Er setzt sich zusammen aus den Aufwendungen für Geburt, Lebensunterhalt und Ausbildung (= Aufzuchtkosten). Verschiedentlich wird auch der Arbeitseinsatz der Mutter sowie der bis zum Todeszeitpunkt aufgelaufene Zins berücksichtigt (Ballmer (1975), Helms (1970), Niklas (1970), Willeke (1967)). Für Personen, die während ihrer Erwerbstätigkeit verunglücken, gelangt der Kosten-Restwert zur Anwendung. Hier werden die bis zum Ausbildungsabschluss aufgelaufenen Kosten ermittelt, unter Annahme einer mittleren Aktivitätserwartung - abhängig von Alter und Geschlecht - abgeschrieben, wobei der Restwert verzinst wird (Ballmer (1975, S. 104)). Die Kostenwertmethode betrachtet den Menschen somit als reinen

Produktionsfaktor, in den bestimmte Beträge investiert werden, welche im Ablauf der Aktivitätszeit als Nutzungspotential zur Verfügung stehen. Dies äussert sich auch in den negativen Wertansätzen für Verstorbene, welche aus dem Erwerbsleben ausgeschieden sind.

Bei den Ertragswertmethoden werden die Bewertungsansätze tödlich Verunfallter aus dem diskontierten Einkommensstrom abgeleitet, welcher in der restlichen Aktivitätszeit angefallen wäre, sofern der Unfalltod hätte vermieden werden können. Die Netto- unterscheidet sich von der Bruttoertragswertmethode dadurch, dass der Eigenkonsum des Getöteten vom potentiell erzielbaren Einkommen abgezogen wird. Verschiedene Autoren berücksichtigen auch den Einkommensausfall von Müttern, sofern diese schulpflichtige Kinder zu betreuen haben (Willeke (1967, S. 30), Ballmer (1975, S. 72)). Unterschiedlich behandelt werden von den verschiedenen Autoren z.B. Kosten, die im Produktionsbereich anfallen, wenn verstorbene Arbeitskräfte ersetzt werden müssen.

Die Nettoertragswertmethode führt zu unsinnigen Ergebnissen, wenn der Wert von verunglückten Personen bestimmt werden muss, die nicht mehr im Erwerbsleben stehen. Für diese ergeben sich negative Bewertungsgrössen. Eine Anwendung dieser Methode in Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Projekten, welche z.B. die Verkehrssicherheit von Rentnern erhöhen würden, ergäbe unsinnige Ergebnisse, welche mit den gesellschaftlichen Präferenzen kaum übereinstimmen dürften. Dieser Mangel hat beispielsweise Dawson (1967) veranlasst, in einer revidierten Berechnung der Unfallfolgekosten für Grossbritannien (1971) die Bruttoertragswertmethode anzuwenden.

Auch die Bruttoertragswertmethode weist Mängel auf. Mishan (1975, S. 300) wirft ihr beispielsweise vor, als einziges Ziel die Sozialproduktmaximierung zu verfolgen. Schwerer wiegen die Annahmen, die sie wie die Nettomethode in den Berechnungen

unterstellt: Es wird von einer vollbeschäftigten Wirtschaft ausgegangen; die Produktivität, die Bevölkerungsstruktur sowie die Einkommens- und Konsumrelationen werden als unveränderlich angenommen oder sind explizit zu berücksichtigen.

Trotz aller Einwände, welche gegen die Bewertungsmethoden vorgebracht werden, scheint uns die Anwendung des Bruttoertragswertes als grober Richtwert am ehesten geeignet, sofern er als minimaler Betrag interpretiert werden darf, den die Gesellschaft zur Verhinderung eines tödlichen Unfalls bzw. zur Erhaltung eines Menschenlebens zu zahlen bereit ist.

Damit ist die weitergehende Frage nach einer Gesamtbewertung natürlich nicht gelöst. Dazu müsste ein Maximalbetrag angegeben werden können, über den hinaus keine Massnahmen zur Lebenserhaltung oder Risikominderung mehr eingesetzt werden dürften (Goodwin (1973, S. 289)).

Die im Schrifttum aufgeführten Bewertungsvorschläge weisen einen ausserordentlich grossen Streubereich auf. Dafür sind, ausser den zum Teil weit auseinanderliegenden Berechnungszeitpunkten, auch das Einkommensniveau (bzw. Volkseinkommensniveau), die unterschiedliche Berücksichtigung von Arbeitsausfällen und Freizeitverlusten, der verwendete Diskontsatz usw. verantwortlich.

Zwei Arbeiten sind für uns von besonderem Interesse, weil sie die schweizerischen Verhältnisse berücksichtigen. Wittmann (1973) versuchte, die Strassenverkehrsunfallkosten für das Jahr 1970 zu schätzen, wobei er sich stark an die Arbeit von Helms (1970) anlehnt. Wir werden uns im 4. Kapitel auf die Berechnungen Ballmers (1975) abstützen, der die Unfallfolgekosten nach der Bruttoertragswertmethode für 1972 berechnete.

35. Lärmvermeidungskosten

Der von den Verkehrsmitteln im Betriebszustand emittierte Lärm beeinflusst als externer Effekt das Nutzenniveau der Betroffenen. Die vom Individuum empfundene Störung ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Die wichtigsten sind: Ausgestrahlte akustische Energie der Schallquellen, Art und Zusammensetzung der Geräusche, Ausbreitungsbedingungen zwischen Quelle und Empfänger sowie dessen Lärmempfindlichkeit. Die Quantifizierung der Lärmwirkungen setzt voraus, dass der Lärm in physikalischen Einheiten gemessen und in subjektive Lärmmasse transformiert werden kann.

351. Messung des Verkehrslärms

Der Schallwechseldruck p eignet sich nicht als Messgrösse des Verkehrslärms, weil er sich in einem sehr grossen Bereich bewegen kann und dem Frequenzaufbau des Geräusches nicht Rechnung trägt. Deshalb wird der gemessene Druck p auf den akustisch gerade noch wahrnehmbaren Druck p_0 bezogen. Der dekadische Logarithmus dieses Verhältnisses wird als linearer Schallpegel L_1 (Sälzer (1975)) bezeichnet.

$$L_1 = 20 \log(p/p_0) \qquad \{dB\} \qquad (3.18)$$

Da die Schallintensität I dem Quadrat des Schalldrucks proportional ist, gilt auch

$$L_1 = 10 \log(I/I_0) \qquad (3.19)$$

Um dem frequenzabhängigen Lärmempfinden des Hörorgans Rechnung zu tragen, werden die einzelnen Frequenzen gewichtet, wobei heute für die Beurteilung des Strassenverkehrslärms fast ausschliesslich der quasi-subjektive, A-bewertete Schallpegel {dB(A)} verwendet wird.

Zeitlich schwankende Geräusche werden entweder durch einen Summenhäufigkeitspegel L_x, der in x % der Untersuchungsperiode erreicht oder überschritten wird, oder durch den Mittelungspegel L_{eq} (= energieäquivalenter Dauerschallpegel) charakterisiert. Der Dauerschallpegel ist ein Mass für die im Mittel über den Beurteilungszeitraum T je Zeit- und Flächeneinheit emittierte Schallenergie und ist definiert als (Gruber (1975, S. 108)):

$$L_{eq} = 10 \log\{\int_0^T \frac{1}{T} 10^{0,1\, L(t)} dt\} \quad \{dB(A)\} \qquad (3.20)$$

mit $L(t) = 10 \log(I(t)/I_0)$

sowie I_0 = Bezugsschallpegel = 10^{-12} Watt/m^2

Er wird benützt, um die subjektive Wirkung zeitlich schwankender Geräusche zu erfassen.

352. Berechnung des Verkehrslärms

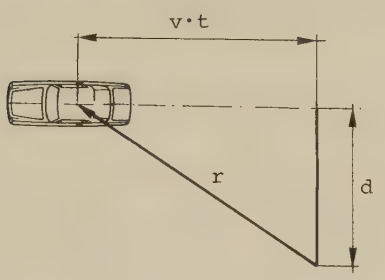
Wird ein Fahrzeug als punktförmige, sich mit der Geschwindigkeit v fortbewegende Schallquelle betrachtet, so fällt beim Beobachter pro Flächeneinheit zum Zeitpunkt t nach Johnson (1968, S. 287) die Energie

$$e(t) = \frac{Q}{2\pi r^2} \quad \text{ein,} \qquad (3.21)$$

wobei mit Q die akustische Leistung des Verkehrsmittels und mit r der Abstand zwischen Fahrzeug und Empfänger (Abbildung 3.5) bezeichnet wird. Während der Fahrt eines Fahrzeugs auf einer geraden, unendlich langen Strasse ist die auf einen Beobachter einwirkende Gesamtenergie gegeben durch

$$e = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{Q}{2\pi r^2} dt \qquad (3.22)$$

Abbildung 3.5: Bezeichnungen



Wird mit d der Abstand des Beobachters von der Strasse bezeichnet, so gilt:

$$r^2 = d^2 + (v\,t)^2 \qquad (3.23)$$

Durch Einsetzen von Gleichung 3.23 in 3.22 und Integration folgt:

$$e = \frac{Q}{2\pi vd} \text{ arc tg } \frac{v\,t}{d}\Big|_{-\infty}^{+\infty} = \frac{Q}{2vd} \qquad (3.24)$$

Für M akustisch identische Fahrzeuge pro Stunde berechnet sich die pro Flächeneinheit beim Beobachter einfallende Energie zu e·M, und die durchschnittliche Intensität {Energie/Fläche·Zeiteinheit} ist gegeben durch

$$I = \frac{eM}{3600} = \frac{Q}{2vd}\,\frac{M}{3600} \qquad (3.25)$$

Setzt man diesen Wert in Gleichung 3.20 ein, so ist der energieäquivalente Dauerschallpegel bestimmt durch

$$L_{eq} = 10 \log\left(\frac{Q}{2\cdot 3600\ v\ 10^{-12}}\,\frac{M}{d}\right) \qquad (3.26)$$

$$= 10 \log \frac{Q}{7200\ v} + 120 + 10 \log \frac{M}{d} \qquad (3.27)$$

Aus Gleichung 3.27 ist ersichtlich, dass eine Verdoppelung von M den Dauerschallpegel um 3 dB(A) erhöht; die gleiche Wirkung wird bei einer Halbierung des Abstandes zwischen Beobachter - Strasse erzielt.

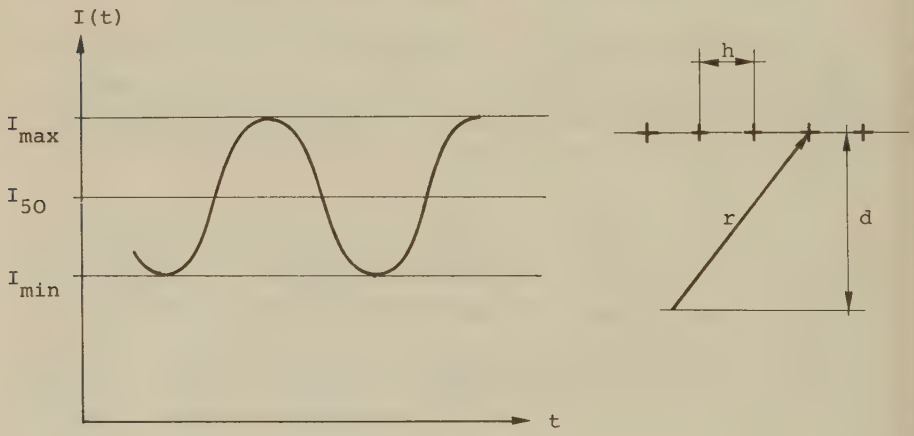
Die Abhängigkeit zwischen Summenhäufigkeitspegeln und L_{eq} kann nur unter vereinfachenden Annahmen in analytischer Form dargestellt werden. Rathé (1966, S. 274) gibt für eine Fahrzeugkolonne, die aus akustisch identischen Fahrzeugen zusammengesetzt ist, folgenden Intensitätsverlauf an:

$$I(t) = \frac{Q}{dh2} \cdot \frac{\sinh \frac{2\P d}{h}}{\cosh \frac{2\P d}{h} - \cos \frac{2\P vt}{h}} \qquad (3.28)$$

h = durchschnittlicher Abstand von Fahrzeugspitze zu Fahrzeugspitze

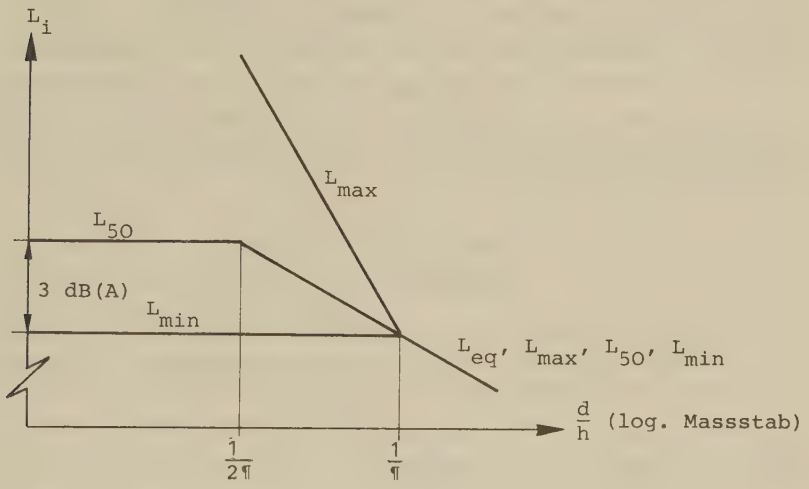
Für feste d und h sind die hyperbolischen Funktionen in Gleichung 3.28 konstant und die Intensität folgt zeitlich einer periodischen Schwingung, deren Verlauf in Abbildung 3.6 schematisch aufgezeichnet ist.

Abbildung 3.6: Intensitätsverlauf bei Kolonnenverkehr



Berechnet man I_{min}, I_{50} und I_{max} und ersetzt man die hyperbolische Funktionen durch die Gleichungen der Asymptoten, so erhält man den in Abbildung 3.7 dargestellten Intensitäts- bzw. Pegelverlauf:

Abbildung 3.7: Abfall der verschiedenen Schallpegel als Funktion des Verhältnisses Beobachtungs- zu Kolonnenabstand



Wird in Abbildung 3.7 der Grenzabstand d = 1/¶ überschritten, so ist der Verlauf für alle Schallpegel gleich. Für kleinere d nimmt L_{max} mit 6 dB(A) pro Halbierung des Verhältnisses d/b zu. Der mittlere Summenhäufigkeitspegel wächst mit 3 dB(A), bis der halbe Grenzabstand erreicht wird, während der Grundgeräuschpegel L_{min} konstant bleibt.

Abweichungen von den Modellannahmen, die eine ebene Strasse, trockenen Belag, freie Schallausbreitung, konstante Fahrgeschwindigkeit und akustisch homogene Fahrzeuge vorausstzen, können durch Korrekturgrössen berücksichtigt werden, welche aber den grundsätzlichen Pegelverlauf nicht ändern (Lauber, (1976)).

Die Abhängigikeit des Schallpegels von der Verkehrsmenge in innerstädtischen Verhältnissen kann nach Bruckmayer (1971, S. 22) mit

$$L_{eq} = 37 + 10 \log M \qquad (3.29)$$

angegeben werden, falls Personenwagenverkehr vorherrscht. Aehnliche Angaben finden sich auch in Buchta (o.J.) und Lauber (1976). Der Einfluss von Lastwagen (bzw. Bussen) auf den L_{eq} wurde von Stephenson (1968, S. 254) untersucht. Seine Auswertungen ergeben, dass ein LW akustisch etwa 10 Personenwagen gleichgesetzt werden kann. Dieses Ergebnis wurde durch Messungen von Eggensberger (1975, S. 160) bestätigt. Er gibt folgende Formel an:

$$L_{eq} = L_0 + 10 \log(M_{PW} + 10\ M_{LW})$$

wobei L_0 = 40.5 für einen Bebauungsabstand vom Strassenrand zwischen 3 und 5 m

L_0 = 38 für einen Abstand zwischen 6 und 9 m

353. Wirkungen des Verkehrslärms

Mit dem äquivalenten Dauerschallpegel ist ein Quantifizierungsmassstab gegeben, der das subjektive Lärmempfinden beschreibbar macht. Negative Wirkungen gehen vom Lärm aber erst aus, wenn gewisse Reizschwellen überschritten werden. Dies geht auch aus der Definition Klosterkötters (1973, S. 113) hervor, der den Lärm als "unerwünschten, störenden oder gesundheitsschädigenden Schall" umschreibt.

Der vom Strassenverkehr erzeugte Lärm erreicht höchstens in Ausnahmefällen Intensitäten, welche zu Schwerhörigkeit oder direkten Hörschäden führen. Da das Wohlstandsniveau aber bereits bei kleineren Lärmpegeln beeinträchtigt wird, müssen andere Kriterien zur Grenzwertfestlegung herangezogen werden. Nach Klosterkötter (1974, S. 32) kann abgestellt werden auf:

- die Behinderung der Kommunikation und der akustischen Umweltorientierung durch Störgeräusche im Lehr-, Lern-, beruflichen und Wohnbereich. Zwischen Sprachpegel, Störgeräuschpegel und Distanz Sprecher - Hörer bestehen relativ feste Beziehungen. Danach muss der Störgeräuschpegel bei vertrautem Vokabular etwa 10 dB(A) unter dem Sprachschallpegel lie-

gen, wenn volle Satzverständlichkeit ohne Informationsverlust gewährleistet sein soll. Dies führt zu Immissionsrichtwerten von 35 dB(A) für Schulräume bis zu 50 dB(A) für Grossraumbüros, Gaststätten usw. Innerhalb von Wohnräumen ist ein Richtwert von 40 dB(A) einzuhalten.

- die Störung von Leistungen. Bisherige Laboruntersuchungen haben gezeigt, dass Lärm leistungsverbessernd, -neutral oder -verschlechternd wirken kann. Die Wirkungen sind von vielen Faktoren abhängig und deshalb schwanken die sich aus diesem Kriterium ableitenden Richtwerte stark.
- die Belästigung. Neben messbaren Grössen der Geräusche sind auch die Informationshaltigkeit, die Einstellung zum Lärmerzeuger, Erwartungseffekte usw. massgebend. Innerhalb von Wohnräumen wurden Geräuschpegel von 35 - 40 dB(A) tagsüber akzeptiert; diese Werte leiten sich aus Befragungen ab, die von Bruckmayer (1971) sowie Rucker (1975) durchgeführt wurden.

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass bis heute keine genau festlegbaren Grenzwerte existieren, welche vom Strassenverkehr nicht überschritten werden dürfen. Die Festlegung von Grenzwerten muss deshalb bis zu einem gewissen Grade als willkürlich bezeichnet werden und enthält ein Werturteil über den Bevölkerungsanteil, welcher infolge der zugelassenen Grenzwerte einen Wohlstandsverlust in Kauf nehmen muss.

354. Bewertungsansätze

Eine direkte Bewertung durch Transformation der Immissions- in eine Schadenfunktion ist, wie wir bei der Diskussion der Lärmwirkungen feststellen konnten, nicht möglich. Eine Bewertung analog zu den Unfallkosten ist ebenfalls nicht durchführbar, weil die Lärmfolgen nicht eruiert werden können. Die Ableitung von Lärmfolgekosten aus der Wertminderung von Grund-

stücken scheitert, wie wir im Abschnitt 226 gesehen haben, an methodischen Mängeln. Selbst wenn diese hingenommen würden, ergäbe sich die Schwierigkeit, diese Wertminderungen für unterschiedliche, von der Verkehrsteilung abhängige Lärmpegel zu berechnen. Die Herleitung von Lärmfolgekosten aus gerichtlich verfügten Entschädigungszahlungen scheitert an den einschneidenden Prämissen, die an solche Leistungen gestellt werden (BGE 94 I 300, 95 I 493, 98 Ib 331).

Die Methode der Vermeidungskosten leitet die Bewertungsgrössen aus Massnahmen ab, welche die Immissionen beseitigen oder zumindest unter die (politisch festgelegten) Grenzrichtwerte drücken. Dies kann entweder durch Massnahmen an der Emissionsquelle oder beim Empfänger erfolgen. Ist die soziale Zahlungsbereitschaft als Funktion der Pegelgrössen gegeben, so ist mit dieser Methode zumindest die optimale Lärmreduktion bestimmbar.

Von dieser Idee geht Willeke (1975) aus. Er unterstellt, dass zwischen Emissionen (bzw. Immissionen) und der als homogen vorausgesetzten Verkehrsmenge eine positive Korrelation besteht. Stimmt die Lärmbelastung gerade mit dem Grenzwert überein, so sind die Grenzkosten gegeben durch die Aufwendungen, welche bei einer weiteren Erhöhung der Verkehrsmenge anfallen, um den Lärmpegel wieder auf den Grenzwert zu reduzieren. Dies kann entweder durch aktive Massnahmen am Fahrzeug oder durch passive Massnahmen beim Betroffenen erfolgen. Die Berechnungen Willekes wollen wir nicht im einzelnen darstellen. Schwierigkeiten bereitet insbesondere die Kostenzurechnung auf den Tages- und Nachtverkehr, weil in diesen Zeiten unterschiedliche Grenzwerte zur Anwendung kommen. Je nach Verkehrsbelastung und städtebaulicher Struktur erhält Willeke (1975, S. 123) Grenzkosten, die tagsüber zwischen 0,9 und 15,9, nachts zwischen 0,4 und 112,3 Pfennigen (≙ Rappen) schwanken.

Andere Autoren verzichten auf eine monetäre Bewertung der Lärmfolgen. So wird beispielsweise von Apel (1973, S. 33) vorgeschlagen, den Lärmpegel in einen Lärmstörungsgrad zu transformieren. Dieses Verfahren mag so lange vorteilhaft sein, als allein Lärmwirkungen zu beurteilen sind. In einer Gesamtbewertung, welche auch andere Einflussgrössen berücksichtigen muss, bringt dieses Verfahren keine Vorteile.

Es bestehen auch Ansätze, welche versuchen, durch Lärmschutzmassnahmen verhinderte Wohlstandseinbussen zu berechnen (Sälzer (1975, S. 47)). Im Optimum wird jenes Massnahmenbündel realisiert, dessen Kosten die Nutzeneinbussen gerade kompensiert. Auch diese Verfahren beruhen auf einer Reihe von Annahmen, die empirisch nicht verifiziert sind. Deshalb verzichten wir an dieser Stelle auf eine weitere Diskussion, umso mehr, als die grundsätzlichen Probleme bereits in Abschnitt 22 aufgezeigt wurden.

355. Einfluss der Verkehrsteilung auf die Höhe des Lärmpegels

Für die Bestimmung des Lärmpegels gehen wir von Gleichung 3.30 aus; da uns nur die Pegeldifferenzen interessieren, setzen wir $L_0 = 0$. Die Berechnung wird für eine Verkehrsleistung von 5800 Personenkilometern/Stunde durchgeführt, um einen möglichst grossen Substitutionsbereich der Verkehrsmittel PW und Bus betrachten zu können. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.3 dargestellt.

Tabelle 3.3: Aequivalenter Dauerschallpegel in Funktion des Modal - Split

y_1	y_2	M_1	M_2	$L_{eq}(M_2)$	$2M_2$	$L_{eq}(2M_2)$
0	4.89	0	19.3	22.9	38.6	25.9
10	4.15	117	16.4	24.5	32.8	26.5
20	3.44	230	13.6	25.6	27.2	27.0
30	2.77	337	10.9	26.5	21.8	27.4
40	2.14	436	8.4	27.2	16.8	27.8
50	1.58	525	6.2	27.3	12.4	28.1
60	1.10	603	4.3	28.1	8.6	28.4
70	0.69	667	2.7	28.3	5.4	28.6
80	0.37	717	1.4	28.6	2.8	28.7
90	0.15	751	0.6	28.8	1.2	28.8
100	0.03	769	0.1	28.9	0.2	28.9
105	0.01	772	0.	28.9	0.	28.9

Wie der erste und letzte Wert der Kolonne $L_{eq}(M_2)$ zeigen, beträgt die grösste Pegeldifferenz 6 dB(A). Diese Pegelwerte wurden unter der Voraussetzung berechnet, dass in der Gegenrichtung keine Fahrzeuge verkehren. Wird berücksichtigt, dass zumindest die Buszahl in beiden Fahrtrichtungen aus betrieblichen Gründen gleich gross ist, so erhält man die in Kolonne $L_{eq}(2M_2)$ aufgeführten Werte, und die Pegeldifferenz sinkt auf maximal 3 dB(A). Da Lärmpegeldifferenzen von 3 dB(A) an der Grenze der Wahrnehmbarkeit liegen, kann gefolgert werden, dass die Lärmbelastung durch die Verkehrsmittelsubstitution nicht wesentlich beeinflusst wird. Aus diesem Grunde werden wir die Lärmwirkungen aus den weiteren Betrachtungen ausschliessen.

36. Abgasvermeidungskosten

Verkehrsmittel emittieren bei der Verbrennung fossiler Treibstoffe, aus denen sie ihre Bewegungsenergie beziehen, eine Reihe gasförmiger und fester Substanzen, die teilweise gesundheitliche Schäden bei Mensch und Tier hervorrufen können. Neben anderen Emittenten (Industrie, Hausbrand) sind die Verkehrsmittel auch für Schäden verantwortlich, die Sachgütern durch langdauernde Einwirkung von Schadstoffen zugefügt werden.

Das Ausmass der Luftbelastung durch Abgase wird von vielen Faktoren bestimmt. Die Abgase setzen sich aus verschiedenen Komponenten zusammen, deren Anteile sich mit dem Betriebszustand des Motors verändern. Die Schadstoffausbreitung wird von topographischen und meteorologischen Parametern beeinflusst, und die einzelnen Komponenten können während des Ausbreitungsvorganges chemische Reaktionen unter sich oder mit der umgebenden Luft eingehen. Aussagen über Immissionshöhen sind darum mit grossen Unsicherheiten verbunden.

Die Beurteilung von Immissionswirkungen auf die Betroffenen ist schwierig, weil sie nur unter Berücksichtigung der Expositionsdauer erfolgen kann; auch die körperliche Beanspruchung ist von Bedeutung. Das Wohlbefinden kann bereits beeinträchtigt sein, wenn physiologisch noch keine Bedenken bestehen. Eine nur auf medizinischen Kriterien beruhende Festlegung von Grenzwerten eignet sich deshalb - wie wir bereits bei den Lärmwirkungen gesehen haben - nicht, um den Nutzenverlust der Betroffenen zu erfassen.

Der Anteil des Strassenverkehrs an der Gesamtbelastung der Atmosphäre erreichte 1970 im Kanton Zürich ca. 33 %, wobei sich bei den einzelnen Schadstoffkomponenten grosse Unterschiede ergaben. In Tabelle 3.4 sind die Werte für:

SO_2: Stickstoffdioxid
CO : Kohlenmonoxid
NO_x: Stickoxide
CH : Kohlenwasserstoff

aufgeführt.

Tabelle 3.4: Hauptquellen der Luftverunreinigung im Kanton Zürich, 1970

Schadstoff / Verursacher	SO_2	CO	NO_x	CH	Russ und Staub
Wärmeerzeugung inkl. Industrie	23 500	70 000	9 400	10 500	7 000
Strassenverkehr		52 000	3 700	2 100	2 600
Flugverkehr		1 000	300	2 700	400
Total (in Tonnen)	23 500	123 000	13 400	15 300	10 000

Quelle: AfRZ (1976, S. 51)

Kleinräumig sind sehr grosse anteilsmässige Abweichungen von diesen Werten zu erwarten. Nach BMI (1974) lag der verkehrsbedingte Emissionsanteil in der BRD bei 51 %, während Dreihaupt (1974, S. 291) für Köln auf 26 % und für München auf 90 % kommt.

Der Einfluss der Verkehrsteilung auf die Immissionsbelastung im unmittelbaren Strassenraum ist zweifacher Art: Erstens kann durch öffentliche Verkehrsmittel der spezifische Energieverbrauch (d.h. pro Leistungseinheit) gesenkt werden, zweitens hat der verwendete Treibstoff einen wesentlichen Einfluss auf die Emissionsvolumina der einzelnen Schadstoffe, wie Tabelle 3.5 zeigt:

Tabelle 3.5: Emissionsvolumen verschiedener Schadstoffe für Benzin- und Dieselmotor

Abgaskomponente	Benzinmotor	Dieselmotor
CO	274 kg/1000 Liter	7,1 kg/1000 Liter
CH	24 "	16,4 "
Aldehyde	0,5 "	1,2 "
NO_x	13,5 "	26,4 "
SO_2	1,1 "	4,8 "
organische Säuren	0,5 "	3,7 "
Feststoffe	1,4 "	13,2 "
3,4 Benzpyren	72 mg/1000 Liter	105 mg/1000 Liter
Blei	5-30 mg/m^3 Abgas	-

Quelle: Dreihaupt (1971, S. 35)

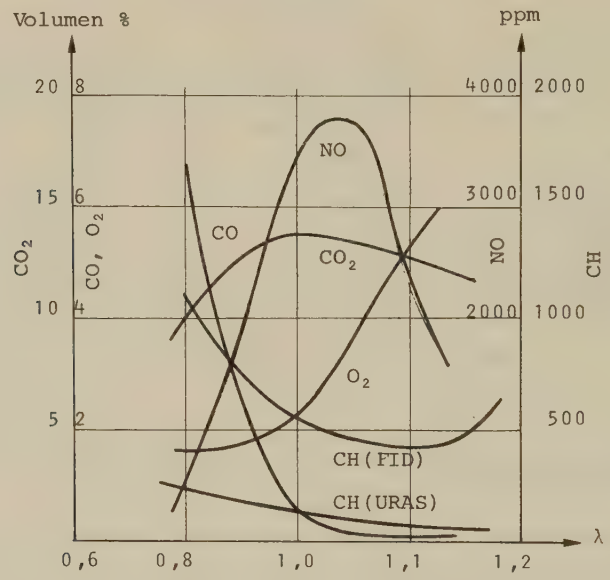
361. Abgasemissionen

Die vom Fahrzeug pro Strecken- und Zeiteinheit emittierten Schadstoffe werden zur Bestimmung der Immissionen benötigt, welche wiederum zur Beurteilung der Schädigungswirkung unerlässlich sind. Sind die Emissionen pro Schadstoff und Verkehrsmittel bekannt, so bereitet die Bestimmung der Emissionen für den Gesamtverkehr keine besonderen Schwierigkeiten. Sie ergibt sich durch Multiplikation der Verkehrsmenge {Fz/h} mit der Emission pro Fahrzeug {g/km·Fz}, summiert über die beiden Verkehrsmittel PW und Bus.

3611. Benzinmotor

Die Emissionen des Benzinmotors werden in erster Linie von der Luftverhältniszahl λ beeinflusst, die als Verhältnis von tatsächlicher und (für eine vollständige chemische Verbrennung) erforderlicher Luftmenge definiert ist (Siegert (1975, S. 50)). In Abbildung 3.8 ist der Verlauf der einzelnen Schadstoffkomponenten schematisch dargestellt:

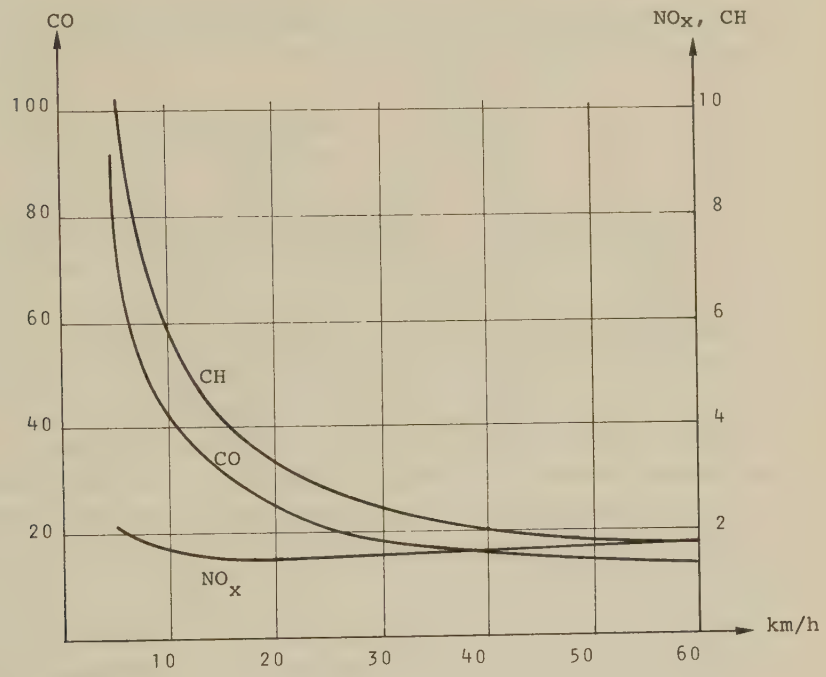
Abbildung 3.8: Abhängigkeit einzelner Abgaskomponenten von der Luftverhältniszahl λ



Quelle: May (1973)

Neben der Luftverhältniszahl sind eine Reihe weiterer Faktoren für das durchschnittliche Emissionsverhalten bedeutsam, z.B. konstruktionsspezifische Merkmale des Motors (Leistung, Verdichtungsverhältnis, Hubraum). Zudem muss die zeitliche Verteilung der einzelnen Betriebszustände bekannt sein. Diese wurde von May (1973) durch Messungen in Köln ermittelt und mit der Reisegeschwindigkeit korreliert; für schweizerische Verhältnisse wurde das durchschnittliche Emissionsverhalten von Pelli (1977) quantifiziert. Die resultierenden Emissionen in Abhängigkeit von der Reisegeschwindigkeit sind in Abbildung 3.9 für einige Schadstoffkomponenten aufgezeichnet.

Abbildung 3.9: Schadstoffemissionen in Abhängigkeit von der Reisegeschwindigkeit (Liter/Fahrzeugkilometer)



Quelle: Pelli (1977)

3612. Dieselmotor

Die Methodik zur Ermittlung der Emissionen ist gleich wie beim Personenwagen, so dass auf weitere Erläuterungen verzichtet werden kann. Zu erwähnen ist, dass nur wenig Untersuchungsmaterial für Fahrzeuge mit Dieselmotoren vorliegt und deshalb nach Pelli (1977) bei einzelnen Schadstoffen mit Abweichungen bis zu ± 70 % vom Mittelwert zu rechnen ist. Die Kurven verlaufen ähnlich wie jene in Abbildung 3.9.

362. Abgasimmissionen

Sind die Emmissionen bekannt, so können die Immissionen unter Berücksichtigung der Ausbreitungsbedingungen mit Hilfe von Modellen berechnet werden.

Die Bestimmung der Immissionskonzentrationen im Nahbereich der Strasse erfolgt in der Regel durch Superposition der Grundbelastung mit der strassenverkehrsbedingten Zusatzbelastung. Bei Strassen ohne Bebauung erfolgt die Ausbreitung direkt durch Windtransport, in Strassenschluchten durch eine Sekundärströmung, die von Windrichtung und -stärke über der Bebauung abhängig ist. Ein Modell für freie Ausbreitung wurde z.B. von Hess (1973) erarbeitet, eines für Strassen mit beidseitiger Bebauung von Johnson (1973). Beide Modelle beruhen auf relativ vielen Annahmen, so dass im Einzelfall mit grossen Streuungen gerechnet werden muss. Genauere Methoden, welche der lokalen Situation besser gerecht werden, sind nur numerisch lösbar und eignen sich nicht für eine Abschätzung der Grössenordnungen, auf die wir uns beschränken wollen (siehe z.B. Deuber (1977)).

Zur Ueberprüfung von Ausbreitungsmodellen und zur Beurteilung der vom Motorfahrzeugverkehr verursachten Immissionsbelastungen wurden an verschiedenen Orten ausgedehnte Messprogramme durchgeführt. Erfasst wurde in erster Linie die Kohlenmonoxidkonzentration, die als Leitkomponente der strassenverkehrsbedingten Luftbelastung gilt. Die Auswertung dieser Messungen, über die z.B. in Dreihaupt (1974) berichtet wird, zeigt, dass

- ein enger Zusammenhang zwischen Verkehrsmenge und CO-Immissionshöhe besteht. Für Stundenmittelwerte ergeben sich z.T. Korrelationskoeffizienten über 0,9.
- die übrigen Schadstoffkomponenten wie CH, NO_x und Blei ähnliche Abhängigkeiten ergeben wie CO, allerdings nicht mit demselben Bestimmtheitsgrad.

- mit zunehmender Windgeschwindigkeit die Schadstoffkonzentration sehr schnell abfällt.

Deuber (1977a) hat durch Auswertung mehrerer Messreihen eine Formel entwickelt, die eine überschlägige Abschätzung der Immissionskonzentration am Strassenrand zulässt:

$$K = 0.18 \frac{M^*}{60} \frac{E}{vbu} \qquad \{ppm\} \qquad (3.31)$$

wobei K den Mittelwert von Halbstundenmesswerten,

M^* die Verkehrsmenge (in beiden Richtungen),

b den Abstand zwischen den Messstellen (~ Strassenbreite),

u die durchschnittliche Windgeschwindigkeit auf mittlerer Dachfirsthöhe oder - bei fehlender Be-Bebauung - in einer Höhe von 10 m,

v die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit aller Fahrstreifen

angibt. Die Emissionsfunktion E des repräsentativen Fahrzeugs hat die allgemeine Form

$$E = \alpha + \beta \, v^{\gamma} \qquad \{Liter/h \cdot Fz\} \qquad (3.32)$$

Die Koeffizienten α, β und γ wurden von Pelli (1977) für 1970 ermittelt. Deuber (1977c) aktualisierte sie auf den Fahrzeugbestand von 1975. In Tabelle 3.6 sind die Koeffizienten für die wichtigsten Abgaskomponenten aufgeführt.

Tabelle 3.6: Koeffizienten der Emissionsfunktion für die wichtigsten Abgaskomponenten

		α	β	γ
Kohlenmonoxid	PW	390	1,20	1.42
	LW (Bus)	98	2,76	1.09
Nichtmethankohlenwasserstoffe	PW	53	0,21	1.33
	LW (Bus)	14	0,39	1.14
Stickoxide	PW	7	0,42	1.33
	LW (Bus)	42	2,91	1.00

Quellen: Pelli (1977), Deuber (1977c)

Wird die Reisegeschwindigkeit in km/h, die Strassenbreite in m, die Windgeschwindigkeit in m/sec und die Verkehrsmenge in Fz/h eingesetzt, so resultiert die Immissionskonzentration K in ppm (parts per million = cm^3/m^3). Betrachtet man nur die Verkehrsmenge in einer Richtung und setzt man dafür statt b nur b/2 in Gleichung 3.32 ein, so erhält man näherungsweise die Immissionskonzentration jener Strassenseite, die an den Verkehrsstrom angrenzt.

363. Wirkungen auf den Menschen

Die toxischen Wirkungen der einzelnen Schadstoffe sind praktisch nur für hohe Konzentrationen bekannt; über die Folgen niedriger Konzentrationen und langer Expositionsdauer bestehen meist nur Vermutungen. Dasselbe gilt für die Wirkungsmechanismen bei gleichzeitiger Einwirkung mehrerer Schadstoffe (Synergismen), die von einer Bildung neuer Komponenten durch chemische Reaktionen in der Atmosphäre begleitet sein kann. Für die einzelnen Schadstoffe gilt:

- Kohlenmonoxid. Da CO ein farb- und geruchloses Gas ist, wirkt es für den Menschen nicht störend. Seine toxische Wirkung besteht in der Unterbindung des Sauerstofftransports und führt bei hohen Konzentrationen zu einer inneren Erstickung. Bereits Konzentrationen von 50 ppm können zu funktionellen Störungen des Nervensystems führen (Knelson (1972)).
- Stickoxide (NO und NO_2). Stickstoffdioxid ist ein Reizstoff, der in hohen Konzentrationen zu einer Quellung des Lungengewebes führt und auch tödliche Folgen haben kann (Lungenödem). Nach Knelson (1975) kann eine lange Expositionsdauer auch die Resistenz gegenüber Atemwegserkrankungen senken. Stickstoffmonoxid ist in den normalerweise auftretenden Konzentrationen unschädlich, es wird aber leicht in NO_2 oxidiert und spielt nach Sommer (1977) eine wichtige Rolle bei der photo-

chemischen Reaktion mit Kohlenwasserstoffen. Die dabei entstehenden Oxidantien wirken bereits in sehr geringen Konzentrationen als Reizstoffe.

- Schwefeloxide werden vom Strassenverkehr nur in unbedeutenden Mengen emittiert; auf eine Beschreibung seiner Wirkungen wird deshalb verzichtet. Siehe z.B. Grandjean (1973), Deuber (1977b).

- Kohlenwasserstoffe. Unter diesem Namen werden eine grosse Anzahl organischer Verbindungen zusammengefasst, deren Wirkungen auf den Menschen heute noch weitgehend unbekannt sind. Polyaromatische Kohlenwasserstoffe wie Benzpyren und Benzol sind mit grosser Wahrscheinlichkeit karzinogen. Sie wirken auch durch ihren penetranten Geruch belästigend und sind bei der photochemischen Smogbildung mitbeteiligt (Schlatter, (1977)).

- Blei. Es gelangt entweder über die Nahrungskette oder die Atemluft in Blut und Gewebe. Schlipköter (1976) glaubt, dass für die heute üblichen Belastungen durch Bleiverbindungen die Auswirkungen noch nicht abschätzbar sind, zu denen beispielsweise der Eingriff in die Hämoglobinbildung, die Resistenzverminderung gegen Infektionen sowie die Beeinflussung des zentralen und peripheren Nervensystems zu zählen sind.

- Russ, der hauptsächlich von dieselbetriebenen Fahrzeugen stammt, ist an sich kaum schädlich. Seine hygienische Bedeutung liegt neben der Verschmutzung in der Transportfunktion, indem Schadstoffe an Russteilchen adsorbiert werden und auf diesem Wege in die Lunge gelangen. Zahlreiche Epidemiologen vermuten, dass zwischen Lungenkrebshäufigkeit sowie Benzpyren- und Russgehalt der Atmungsluft ein Zusammenhang besteht (Grandjean (1973)).

364. Immissionsgrenzwerte

Für die Festlegung von Grenzwerten sind in erster Linie die Auswirkungen der Schadstoffe auf die Gesundheit des Menschen massgebend. Diese sind jedoch, wie wir im letzten Abschnitt feststellen mussten, vor allem langfristig nicht genügend genau bekannt, als dass sie zur Fixierung von Grenzwerten Verwendung finden könnten. Deshalb sind in verschiedenen Ländern mehrere Grenzwerte gültig, je nach angestrebter Schutzwirkung. So sind z.B. die Primärstandards der USA (1971) - Richtlinien auf den Gesundheitsschutz ausgerichtet, während die Sekundärstandards den Schutz von Boden, Pflanzen und Tieren garantieren und auch negative Auswirkungen auf Wetter, Sichtverhältnisse, Komfort und Wohlbefinden verhindern sollen.

In der Schweiz sind bis heute keine rechtlich bindenden Immissionsgrenzwerte festgelegt worden. Für die BRD und die USA sind die Maximalen - Immissions - Konzentrationen in Tabelle 3.7 aufgeführt.

Tabelle 3.7: Immissionsgrenzwerte

Land	CO (ppm)	NO (ppm)	NO_2 (ppm)
USA	9 (8h) 35 (1h)		0.05 (1 Jahr)
BRD (VDI)	45 (30') 9 (24h)	0.8 (30') 0.4 (24h)	0.1 (30') 0.05 (24h)
BRD (TA-Luft)	9 (IW1) 27 (IW2)	0.16 (IW1) 0.48 (IW2)	0.05 (IW1) 0.15 (IW2)

Quellen: USA (1971), VDI (1974)
Dreissigacker (1974)

Während den in Klammern gesetzten Zeiten dürfen die Grenzwerte höchstens einmal überschritten werden.

IW1: Durchschnitt aller 30' Mittelwerte

IW2: 95 % Wert der Summenhäufigkeitskurve

365. Bewertungsansätze

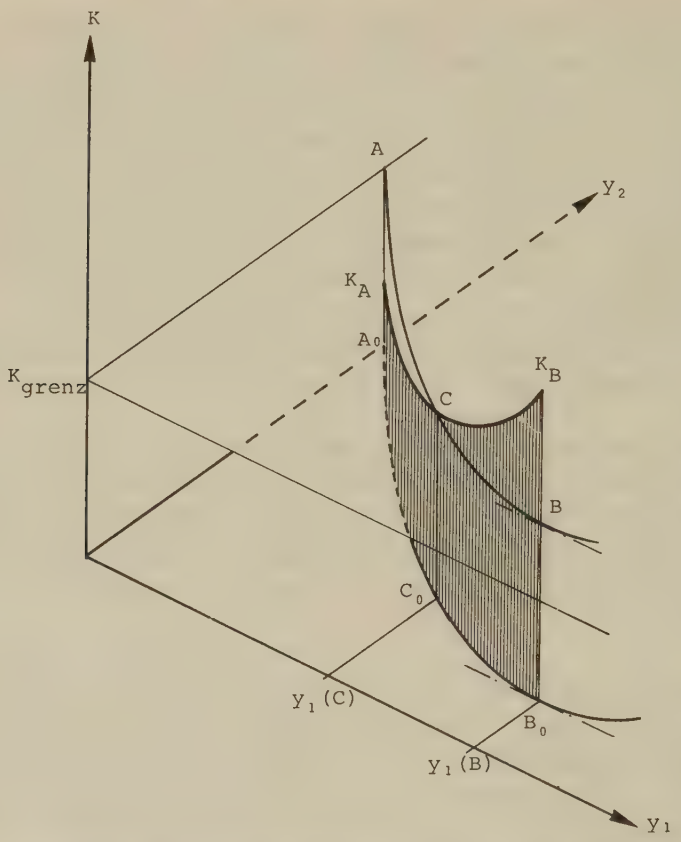
Die direkte Bewertung der Abgasimmissionen, d.h. die Transformation der Immissions- in eine Schaden- bzw. Kostenfunktion, stösst auf die gleichen Probleme, die wir bereits bei der Bewertung der Lärmimmissionen angesprochen haben. Die indirekte Methode der Vermeidungskosten, die wir ebenfalls im letzten Abschnitt besprochen haben, kann auch zur Bewertung der Abgasimmissionen verwendet werden, falls die Immissionsgrenzwerte in voller Kenntnis der Kostenfolgen festgesetzt werden. Trifft dies zu, dann sind die Vermeidungskosten ein Massstab für die soziale Zahlungsbereitschaft und den in Abschnitt 22 besprochenen Bewertungsprinzipien zugänglich.

Ueberschreitungen der Immissionsgrenzwerte im Nahbereich des Verkehrsträgers können durch Einsatz verschiedener Massnahmen, einzeln oder kombiniert, verhindert werden. Beispiele sind die Reduktion der pro Fahrzeug entstehenden Emissionen, die Beschränkung der Verkehrsmenge oder die Aenderung der Verkehrsteilung.

Verkehren im Korridor nur die beiden Verkehrsmittel PW und Bus, dann ist für eine bestimmte Verkehrsleistung und -teilung die Immissionskonzentration am Strassenrand durch Gleichung 3.31 gegeben. In Abbildung 3.10 ist der Immissionsverlauf schematisch dargestellt.

Die Isoquante A_0B_0 in der y_1y_2 Ebene gilt für eine bestimmte Verkehrsleistung. AB stellt die Projektion dieser Isoquante in die zu y_1y_2 parallele Ebene durch den maximal zulässigen Immissionsgrenzwert K_{grenz} dar. Je nach Höhe dieses Wertes durchstösst der senkrecht über der Isoquante aufgetragene Immissionsverlauf K_AK_B diese Ebene im Punkt C. Verkehrsmittelkombinationen zwischen C und B sind unzulässig, weil sie zu hohe Immissionen verursachen. Die Vermeidungskosten sind im

Abbildung 3.10: Immissionsverlauf für eine bestimmte Verkehrsleistung in Funktion des Modal - Split



Falle der Emissionssenkung gegeben durch die Aufwendungen, welche die Immissionskurve $K_A K_B$ unter das Niveau K_{grenz} zu reduzieren vermögen. Sie sind abhängig vom betrachteten Schadstoff und der Grösse der Verkehrsleistung. Die maximal erforderliche Reduktionsquote ist für den in Abbildung 3.10 dargestellten Fall gegeben durch

$$R = \frac{K_B - K_{grenz}}{K_B} \quad , \qquad \{-\} \qquad (3.33)$$

sofern Verkehrsdichten über $y_1(B)$ ausgeschlossen werden. Wird ein Zusammenhang zwischen Reduktionsquote und -kosten unter-

stellt, so können die Vermeidungskosten in Abhängigkeit von Verkehrsleistung, -dichte und -teilung berechnet werden.

Im Falle der Emissionssenkung können sie ermittelt werden aus den Aufwendungen für Abgasreinigungsanlagen, welche zur verlangten Immissionssenkung führen. Schliessen wir die Beschränkung der Verkehrsmenge (bzw. -dichte) aus und betrachten wir den Fall unterschiedlicher Verkehrsteilung, so sehen wir, dass die Reduktionsquote zwischen den Verkehrsdichten $y_1(B)$ und $y_1(C)$ mit zunehmender Substitution individueller durch öffentliche Verkehrsmittel bis auf Null reduziert werden kann.

Bei der Bestimmung der kostenminimalen Verkehrsteilung wollen wir die Abgasvermeidungskosten wie folgt berücksichtigen:

- Da die Emissionen der Busse pro Personenkilometer viel kleiner als jene der Personenwagen sind und die Busdichte ebenfalls bedeutend unter der PW-Dichte liegt, werden die Busemissionen vernachlässigt. Gleichung 3.31 kann dann wie folgt geschrieben werden:

$$K = 0.18 \frac{M_1}{60} \frac{E}{v_1 (b/2) u} \tag{3.34}$$

K gibt die Immissionskonzentration an, welche durch die Personenwagen am unmittelbar angrenzenden Strassenrand verursacht wird. Wegen

$$k = \frac{y_1 f_1}{cL} + \frac{y_2 f_2}{cL} \tag{2.40}$$

$$v_1 = v_0 \, e^{-k^2} \tag{2.27}$$

$$k_1 = \frac{y_1}{L} \tag{2.7b}$$

$$M_1 = k_1 v_1 = \frac{y_1}{L} v_1 \tag{2.1}$$

geht Gleichung 3.34 über in

$$K = 0{,}006 \frac{y_1}{L} \frac{E}{bu} \qquad (3.35)$$

Emissionssenkende Massnahmen müssen ergriffen werden, sobald die Differenz $\Delta K = K - K_{grenz}$ positiv ist. In Tabelle 3.8 sind die Immissionen für eine Verkehrsleistung von 5'800 Pers.km/Stunde berechnet.

Tabelle 3.8: Immissionsverlauf für eine Verkehrsleistung von 5'800 Pers.km/h in Funktion des Modal - Split

y_1	y_2	v_1 (km/h)	K_{CO} (ppm)	K_{NO_x} (ppm)	K_{CH} (ppm)
10	4.15	58.6	1.16	0.15	0.15
20	3.44	57.6	2.31	0.30	0.30
30	2.77	56.2	3.40	0.43	0.44
40	2.14	54.5	4.42	0.56	0.57
50	1.58	52.5	5.41	0.66	0.70
60	1.1	50.2	6.31	0.75	0.82
70	0.69	47.6	7.13	0.82	0.93
80	0.37	44.8	7.86	0.88	1.03
90	0.15	41.7	8.14	0.90	1.12
100	0.03	38.4	9.05	0.91	1.20
105	0.01	36.8	9.30	0.91	1.23

Annahmen: Parameterwerte der Produktionsfunktion siehe Abschnitt 215

b = 8 m, u = 1 m/sec, E nach Gleichung 3.32 und Tabelle 3.6

Ein Vergleich mit den Grenzwerten in Tabelle 3.7 zeigt, dass unter den getroffenen Annahmen der CO-Grenzwert erst etwa für $y_1 > 100$ überschritten und der NO_x-Grenzwert ($\sim NO + NO_2$) nach VDI bei den grössten y_1-Werten gerade erreicht wird, während nach TA-Luft emissionssenkende Massnahmen bereits bei $y_1 = 20$ erforderlich werden. Stellen wir auf die CH-Immissionen ab, so werden die amerikanischen Richtlinien (USA (1971)), die ein maximales Dreistundenmittel von 0,24 ppm vorsehen,

ebenfalls bei $y_1 = 20$ überschritten. Wir werden den Einfluss der Abgasvermeidungskosten in Kapitel 4 aufzeigen unter der Annahme, dass der CH-Immissionsgrenzwert massgebend ist.

- Eine geldmässige Bewertung der Abgasimmissionen ist nur möglich, wenn die Kosten der emissionssenkenden Massnahmen als Funktion der Reduktionsquote angegeben werden können. Entsprechende Angaben sind nur spärlich vorhanden und mit grossen Vorbehalten zu versehen. Da es uns nur darum geht, den Einfluss der Abgasvermeidungskosten auf die Verkehrsteilung grössenordnungsmässig aufzuzeigen, stützen wir uns auf die von Marburger (1974, S. 215) berechneten Werte. Er schätzt, dass eine Reduktion der Emissionen (und damit auch der Immissionen) um 40 % Kosten von 2,5 bis 3,5 Rp. (Mittel ca. 3 Rp.) pro Fahrzeugkilometer verursacht. Wird die Reduktionsquote auf 60 % erhöht, so steigen die Kosten auf ca. 5,8 bis 8 Rp. (Mittel ca. 7 Rp.) pro Fahrzeugkilometer. Nehmen wir an, dass die Kosten von der Reduktionsquote linear abhängig sind, so gilt näherungsweise

$$c_{16} = \frac{7-3}{20\%} R\ 100 \qquad \{Rp./Fzkm\} \qquad (3.36)$$

oder, mit den Gleichungen 3.32, 3.33, 3.35, den Angaben in Tabelle 3.6, b = 8 m, u = 1 m/sec sowie den bereits erwähnten Parameterwerten

$$c_{16} = \begin{cases} 20\ \frac{y_1E-1600}{y_1E} & , \text{falls } y_1E > 1600 \qquad (3.37a) \\ 0 & , \text{falls } y_1E \leq 1600 \qquad (3.37b) \end{cases}$$

4. Bestimmung der kostenminimalen Verkehrsteilung

Unter Benützung der in Abschnitt 213 ermittelten Produktionsfunktion und unter Berücksichtigung der im dritten Kapitel diskutierten Verkehrskosten kann jetzt für jede Verkehrsleistung die kostenminimale Anzahl Personenwagen und Busse berechnet werden. Um quantitative Ergebnisse zu erhalten, müssen für die Betriebskosten des Busses und des Verkehrsträgers, die Unfallfolge- und die Zeitkosten weitere Annahmen getroffen werden. Die Lärmvermeidungskosten wollen wir aus den in Abschnitt 35 erwähnten Gründen aus unseren weiteren Betrachtungen ausschliessen. Dieses Vorgehen ist auch damit begründbar, dass sie prinzipiell wie die Abgasvermeidungskosten behandelt werden können.

Bevor wir auf die Schätzung der bislang noch fehlenden Kostenarten eingehen, wollen wir die Kostengleichung in allgemeiner Form darstellen und die Bedingungen für den kostenminimalen Modal Split herleiten.

41. Kostengleichung

Die Betriebskosten des Personenwagens pro Fahrzeugkilometer haben wir in Abschnitt 31 ausführlich diskutiert. Sie lassen sich in allgemeiner Form schreiben als (siehe Gleichung 3.16)

$$c_{11} = c_{110} + c_{111} \frac{1}{v_1} \qquad (4.1)$$

Die Betriebskosten des Busses pro Fahrzeugkilometer (c_{21}) haben wir als von der Reisegeschwindigkeit unabhängig angenommen, ebenso die Betriebskosten des Verkehrsträgers für PW (c_{12}) und Bus (c_{22}).

Die Zeitkosten pro PW und Kilometer lassen sich unter Berücksichtigung der Anmarsch-, Reise-, Parkplatzsuch- und Gehzeit darstellen als

$$c_{13} = c_{130}\, b_1 \frac{1}{v_1} + c_{130}\, b_1 \frac{r_{13}}{L} \qquad (4.2)$$

Der erste Summand auf der rechten Seite der Gleichung 4.2 gibt die pro Kilometer anfallenden Zeitkosten in Abhängigkeit der Reisegeschwindigkeit v_1 und des Besetzungsgrades b_1 an, wenn mit c_{130} der Zeitwert der Pendler (PW-Fahrer, Insassen PW und Bus) bezeichnet wird. Der zweite Summand umfasst jene Zeitkosten, die pro Fahrt durch Geh- und Parkplatzsuchzeit (r_{13}) anfallen. Um die weiteren Berechnungen zu vereinfachen, werden sie durch die Reiselänge (= Korridorlänge) dividiert und können als Zusatzkosten pro Reisekilometer interpretiert werden.

Die Zeitkosten pro Buskilometer ergeben sich analog zu

$$c_{23} = \frac{c_{130}b_2+2c_{230}}{v_2} + \frac{c_{130}b_2}{2v_2y_2} + \frac{c_{130}b_2r_{23}}{L} \qquad (4.3)$$

Im ersten Summanden sind die Zeitkosten der Pendler und des Busfahrers pro Reisekilometer enthalten. Mit dem Faktor 2 wird dem Umstand Rechnung getragen, dass jeder zusätzlich eingesetzte Bus auch in der Gegenrichtung das Verkehrsangebot automatisch erhöht. Der zweite Summand steht für die Kosten der Wartezeit. Diese wird als halbe Kursfolgezeit angesetzt und leitet sich aus dem Kehrwert von

$$M_2 = \frac{y_2}{L} v_2 \qquad \{\text{Busse/h}\}$$

ab. Die Wartezeit wird (wie die im dritten Summanden enthaltenen Gehzeiten (r_{23})) auf die Reiselänge umgelegt.

Für die Unfallfolgekosten pro Fahrzeugkilometer werden konstante Werte eingesetzt. Die Diskussion in Abschnitt 34 hat gezeigt, dass eine weitere Differenzierung zur Zeit nicht möglich ist. Pro PW und Kilometer betragen sie c_{14}, für den Bus analog c_{24}.

Die Abgasvermeidungskosten des Busses (c_{26}) werden vernachlässigt. Jene des Personenwagens sind durch Gleichung 3.37 gegeben, die folgendermassen geschrieben werden kann:

$$c_{16} = \begin{cases} c_{160} \dfrac{y_1 E(v_1) - r_{16}}{y_1 E(v_1)} & , \text{ falls } c_{16} > 0 \quad (4.4a) \\ 0 & , \text{ falls } c_{16} \leq 0 \quad (4.4b) \end{cases}$$

Pro Kilometer betragen die Kosten des Personenwagens somit

$$c_1 = c_{110} + c_{111} \frac{1}{v_1} + c_{12} + c_{130} b_1 \frac{1}{v_1} + c_{130} b_1 \frac{r_{13}}{L} + c_{14} + c_{160} \frac{y_1 E(v_1) - r_{16}}{y_1 E(v_1)} \quad \{Fr./Fz.km\} \quad (4.5)$$

wobei $c_{16} \geq 0$ vorausgesetzt wird (andernfalls entfällt das letzte Glied). Die Betriebskosten pro Buskilometer belaufen sich unter Berücksichtigung des Gegenverkehrs auf

$$c_2 = 2c_{21} + 2c_{22} + \frac{c_{130} b_2 + 2c_{230}}{v_2} + \frac{c_{130} b_2}{2 v_2 y_2} + \frac{c_{130} b_2 r_{23}}{L} + 2c_{24} \quad \{Fr./Fz.km\} \quad (4.6)$$

In Funktion der Verkehrsleistung V fallen somit stündlich Kosten in der Höhe von

$$C = y_1 v_1 c_1 + y_2 v_2 c_2 \quad \{Fr./h\} \quad (4.7)$$

an. Gleichung 4.7 wird als Kostengleichung bezeichnet. Mit den Abkürzungen

$$TE_6 \equiv c_{110} + c_{12} + c_{130} b_1 \frac{r_{13}}{L} + c_{14} \quad (4.8)$$

$$TE_7 \equiv c_{111} + c_{130} b_1 \quad (4.9)$$

$$TE_8 \equiv 2(c_{21} + c_{22} + c_{24}) + \frac{c_{130} b_2 r_{23}}{L} \quad (4.10)$$

$$TE_9 \equiv c_{130} b_2 + 2c_{230} \quad (4.11)$$

lautet sie

$$C = TE_6 v_1 y_1 + TE_7 y_1 + c_{160} \frac{y_1 E(v_1) - r_{16}}{E(v_1)} v_1 + TE_8 v_2 y_2 + TE_9 y_2 + c_{130} \frac{b_2}{2} \quad (4.12)$$

Setzt man C in Gleichung 4.12 konstant, so erhält man in der y_1-y_2-Ebene eine Isokostenkurvenschar. Auf jeder dieser Kurven kann abgelesen werden, welche Faktorkombinationen gleich hohe Verkehrskosten verursachen.

42. Kostenfunktion

Die Kostenfunktion ist definiert als Minimalkostenkombination in Abhängigkeit von der Ausbringungsmenge. In unserem Falle also:

$$C = C(V) \tag{4.13}$$

Zu ihrer Bestimmung stehen die Gleichungen 2.26, 2.27, 2.40 und 4.12 zur Verfügung. Zusätzlich müssen die Bedingungen erster und zweiter Ordnung für ein Kostenminimum unter der Restriktion V = konstant erfüllt sein. Die Lagrange-Funktion lautet somit

$$Z = C + \lambda(V\text{-konst.}) \rightarrow \text{Minimum} \tag{4.14}$$

Es ist leicht zu erkennen, dass eine explizite Darstellung der Kostenfunktion nach Gleichung 4.13 nicht möglich ist. Leitet man nämlich Z nach y_1 und y_2 ab, so folgt

$$\frac{C_1^*}{C_2^*} = \frac{V_1^*}{V_2^*} \tag{4.15}$$

wobei

$$C_1^* = C_k \frac{f_1}{cL} + C_1 \tag{4.16}$$

$$C_2^* = C_k \frac{f_2}{cL} + C_2 \tag{4.17}$$

während V_1^* und V_2^* weiterhin durch die Gleichungen 2.67 und 2.68 gegeben sind. Die rechte Seite von 4.15 stellt die Steigung der Isoquante in der y_1-y_2-Ebene dar und kann als Quotient

der Gleichungen 2.58 und 2.59 berechnet werden. Die linke Seite von 4.15 bildet sich in der y_1-y_2-Ebene als Tangente an die Isokostenkurve ab.

Die Bedingungen zweiter Ordnung haben ergeben, dass die Produktionsfunktion im ökonomisch relevanten Bereich streng konvex ist. Es würde also genügen, den Nachweis zu erbringen, dass die Isokostenkurven konkav sind. Da die Berechnung der kostenminimalen Faktorkombination nur auf numerischem Wege möglich ist, verzichten wir auf die Beweisführung.

43. Annahmen für die numerische Berechnung

In Kapitel 3 haben wir nur für die (gesamtschweizerisch gültigen) Betriebskosten des Personenwagens und für die auf sehr vagen Annahmen beruhenden Abgasvermeidungskosten numerische Werte angegeben. In diesem Abschnitt wollen wir versuchen, die weiteren Kostenarten zu quantifizieren. Dabei werden wir Datenmaterial verwenden, das weitgehend stadtzürcherische Verhältnisse widerspiegelt. Weil verschiedene Angaben nur für 1975 vorliegen, werden alle Berechnungen auf dieses Jahr ausgerichtet, das auch als Preisbasis für die Betriebskostenberechnung des Personenwagens verwendet wurde.

431. Betriebskosten Bus

Als Grundlage für die Bestimmung der pro Fahrzeugkilometer anfallenden Busbetriebskosten werden interne Unterlagen der VBZ (Verkehrsbetriebe der Stadt Zürich) für 1975 verwendet. Die Annahmen wurden schon in Abschnitt 312 erläutert.

Bei einer Lebensdauer von 11 Jahren und einer durchschnittlichen jährlichen Fahrleistung von 30 000 km betragen die fixen Kosten für Depot, Garagierung und Abschreibungen Fr. 1.68 /km.

Für Unterhalt und Reparaturen sind 70 Rappen/km aufzuwenden; die variablen Garagierungskosten betragen 18, die Vertriebskosten 21 und die Verwaltungskosten 38 Rappen/km, die gesamten Betriebskosten pro Fahrzeugkilometer somit Fr. 3.15/km.

432. Betriebskosten Verkehrsträger

Nach Angaben des kantonalen Strasseninspektorates lagen die Unterhaltskosten pro Strassenkilometer im Jahre 1975 in der Stadt Zürich bei ca. 55 000 Franken/km. Die Fahrleistung des Individualverkehrs beläuft sich nach Jenny (1977) in der Abendspitzenstunde auf ca. 366 000 km und macht etwa 10 % der pro Werktag erbrachten Fahrleistung aus. Wird unterstellt, dass pro Wochenende eine halb so grosse Fahrleistung wie an Werktagen resultiert, so kann die jährliche Fahrleistung auf ungefähr 1 Mia. Fahrzeugkilometer geschätzt werden. Pro Strassenkilometer beträgt der durchschnittliche tägliche Verkehr bei einer Strassenlänge von 720 km somit:

$$\frac{10^9 \text{ Fz.km}}{(720 \text{ km})(365 \text{ Tage})} = 3805 \text{ Fz/Tag}$$

Da die Fahrleistungen der öffentlichen Verkehrsmittel mit etwa 30 Mio. Wagenkilometern nicht ins Gewicht fallen, betragen die Unterhaltskosten pro PW und Kilometer

$$\frac{55\ 000}{365 \cdot 3805} = 3.9 \text{ Rp./PWkm}$$

Nehmen wir an, dass die dem Motorfahrzeugverkehr zurechenbaren Kosten 70 % ausmachen, so erhalten wir als groben Schätzwert ca. 3 Rp./PWkm.

Aus der Kategorienrechnung des Esta (578, S. 60 und 61) für 1974 können wir die Unterhaltskosten pro Personenwagenkilometer bzw. Buskilometer wie folgt berechnen (70 % zurechenbar)

PW : $\frac{36,56 \cdot 10^9}{24,8 \cdot 10^9} = 1,5$ Rp./km;

öffentl. Cars/Busse: $\frac{1,26 \cdot 10^9}{80,1 \cdot 10^6} = 15,8$ Rp./km;

Nehmen wir an, dass die Unterhaltskosten im Stadtverkehr für PW und Bus das gleiche Verhältnis aufweisen wie gesamtschweizerisch, dann sind die Betriebskosten des Verkehrsträgers gegeben durch:

PW : 3 Rp./km

Bus: $\frac{3}{1,5}$ 15,8 = 32 Rp./km

433. Zeitkosten

Für den PW-Fahrer wird angenommen, dass die Gehzeit am Fahrtbeginn 1 Minute, am Fahrtende 5 Minuten beträgt. Die Anmarschzeit für den Busbenützer wird mit 5 Minuten, die Gehzeit am Fahrtende mit 3 Minuten und die durchschnittliche Wartezeit als halbe Kursfolgezeit eingesetzt. Bezogen auf die Gleichungen 4.2 und 4.3 erhalten wir also:

r_{13} = 6 Minuten
r_{23} = 8 Minuten

Der durchschnittliche Stundenlohn eines Pendlers wird aufgrund der Lohnerhebung 1975 auf Fr. 14.-- geschätzt. Dies entspricht dem durchschnittlichen Bruttolohn eines Angestellten der Kategorie 1 und 2 (Die Volkswirtschaft (1976, S. 335), abzüglich 10 % Arbeitnehmerbeiträge für Sozialleistungen. Da wir in Abschnitt 336 (Tabelle 3.2) feststellen mussten, dass bis heute noch kein allgemeingültiger Zeitwert für Pendelfahrten existiert, wollen wir den Einfluss der Zeitkosten auf die Verkehrsteilung mit verschiedenen Zeitwerten aufzeigen, die wir in Prozenten des oben aufgeführten Stundenlohnes angeben. Den

Stundenlohn des Busfahrers entnehmen wir den Unterlagen der VBZ. Er beträgt für 1975 Fr. 36.--. Damit erhalten wir

c_{130} = x % von Fr. 14.--

c_{230} = Fr. 36.--

434. Unfallfolgekosten

Die Bestimmung von Unfallfolgekosten setzt voraus, dass die Fahrleistungen und das Unfallgeschehen für den individuellen und öffentlichen Verkehr bekannt sind oder zumindest geschätzt werden können. Die Unfallraten sind schliesslich mit den pro Unfall im Durchschnitt entstehenden Kosten zu gewichten.

Die Fahrleistung des Individualverkehrs für die Abendspitzenstunde beträgt 366 000 km (siehe Abschnitt 432). Da eine Aufteilung der Unfälle nach Unfallschwere in der städtischen Statistik nicht vorgenommen wird, müssen wir weitere Annahmen treffen, um die Unfallraten berechnen zu können. Diese lauten:

- Die durchschnittliche Unfallzahl pro Werktag entspricht dem arithmetischen Mittel aller Unfälle, die sich an den Werktagen der Jahre 1974 und 1975 ereigneten.
- Die Anzahl der Leicht- und Schwerverletzten pro Unfall ist vom Wochentag (inkl. Samstag und Sonntag) unabhängig.
- Bei den Unfällen mit tödlichem Ausgang, die sich am Wochenende ereignen, entspricht die Unfallzahl der Anzahl Toten.

Damit erhalten wir folgende Unfallziffern:

Tabelle 4.1: Unfälle an den Werktagen der Jahre 1974 und 1975 in der Stadt Zürich

Jahr	Anzahl Unfälle mit			Anzahl		
	Sachschaden über Fr. 200.--	Verletzten	Toten	Verletzte leicht	schwer	Tote
1974	4544	1566	44	875	929	47
1975	4570	1372	37	755	835	39

Quellen: AfVZ (1974), AfVZ (1975)

- Die Dunkelziffer für Unfälle mit Sachschaden über Fr. 200.-- beträgt 80 %, jene für Leichtverletzte 75,5 %. Diese Angaben und die Umrechnungsmethode werden von Ballmer (1975, S. 126) übernommen. Aus Tabelle 4.1 erhalten wir folgende Zahlen

Tabelle 4.2: Unfallzahlen an den Werktagen 1974 und 1975 der Stadt Zürich unter Berücksichtigung der Dunkelziffer

Jahr	Anzahl Unfälle mit			Anzahl		
	Sachschaden über Fr. 200.--	Verletzten	Toten	Verletzte leicht	schwer	Tote
1974	22720	3890	44	3553	929	47
1975	22850	3365	37	3065	835	39

- Der Anteil der Unfälle mit Personenwagenbeteiligung an der korrigierten Zahl aller Strassenverkehrsunfälle und -unfallfolgen ist gleich wie bei den polizeilich registrierten Unfällen. Für 1974 beträgt dieser Anteil 74 %, im Jahre 1975 72 % (AfVZ (1974), AfVZ (1975)).

- Die Unfälle in der Abendspitzenstunde machen 10 % aller polizeilich registrierten Unfälle aus. Da die Fahrleistung ebenfalls von diesem Anteil des durchschnittlichen täglichen Verkehrs ausgeht, sind hier keine Korrekturen erforderlich. Die für uns massgebenden Unfallzahlen lauten somit:

Tabelle 4.3: Unfälle, die sich während der werktäglichen Abendspitzenstunden der Jahre 1974 und 1975 in der Stadt Zürich mit Beteiligung von Personenwagen ereigneten.

Jahr	Anzahl Unfälle mit			Anzahl			
	Sachschaden	Verletzten	Toten	Verletzte leicht	schwer	total	Tote
1974	1681	288	2.3	263	69	332	3.5
1975	1645	242	2.7	221	60	281	2.8
Total	3326	530	6	484	129	613	6.3

· In die Jahre 1974 und 1975 fallen insgesamt 502 Arbeitstage (= "normaler Werktag"). Nimmt man an, dass die Fahrleistungen sich zwischen 1974 und 1975 nicht wesentlich verändert haben, so erhalten wir für die 502 Arbeitstage eine Gesamtleistung von 183,4 Mio. Fahrzeugkilometern. Vermindern wir diese um 10 %, um die Fahrleistungen des Strassengüterverkehrs zu berücksichtigen, dann erhalten wir:

$$r_{141} = \frac{3326}{165,36} = 20 \text{ Unfälle mit Sachschaden/1 Mio. Fzkm}$$

$$r_{142} = \frac{530}{165,36} = 3,2 \quad " \quad " \quad \text{Verletzten/} \quad "$$

$$r_{143} = \frac{6}{165,36} = 0,04 \quad " \quad " \quad \text{Toten/} \quad "$$

Die Fahrleistungen der öffentlichen Verkehrsmittel sind aus den Betriebsstatistiken der VBZ genau bekannt, hier müssen keine Annahmen getroffen werden. Um eine repräsentative durchschnittliche Unfallrate zu erhalten, berechnen wir den Mittelwert für die Jahre 1972 - 1976. Die Fahrleistungen können der Tabelle 4.4 entnommen werden

Tabelle 4.4: Fahrleistungen der Busflotte der VBZ in den Jahren 1972 - 1976 in Tausend km

Jahr	Trolleybus	Autobus	Busbetrieb
1972	2061	7513	
1973	2100	8100	10200
1974	2292	8446	10738
1975	3192	8317	11509
1976	3516	8299	11815
Total	13161	40676	53837

Das Unfallgeschehen wird ebenfalls VBZ-intern erfasst. Damit gehen praktisch alle Schadenereignisse in die interne Statistik ein, und die Dunkelziffer ist vernachlässigbar klein. Vergleichen wir die interne mit der Polizeistatistik, so sehen wir, dass im Jahre 1975 intern 1240 Unfälle mit Sachschaden registriert, aber nur in 227 Fällen ein Polizeirapport erstellt

wurde. Daraus resultiert eine Dunkelziffer von 82 %. Von 142 Verletzten (ohne Fahrgäste) erscheinen in der offiziellen Statistik nur deren 37, was eine Dunkelziffer von 74 % ergibt. Damit werden die von Ballmer (1975) geschätzten Werte - 80 % für Sachschadenunfälle, 75,5 % für Unfälle mit Leichtverletzten - eindrücklich bestätigt.

Die tageszeitliche Verteilung der Unfälle, sowohl was die Kollision mit anderen Verkehrsteilnehmern als auch die verletzten Fahrgäste betrifft, kann nach Auskunft des Unfallbüros der VBZ gleich angenommen werden wie in der amtlichen Statistik. Das Unfallgeschehen der Jahre 1972 - 1976 ist in den Tabellen 4.5 und 4.6 enthalten.

Tabelle 4.5: Anzahl Unfälle mit Sachschaden 1972 - 1976 für die Busflotte der VBZ

Jahr	Trolleybus	Autobus	Busbetrieb
1972	134	233	367
1973	125	232	357
1974	129	235	364
1975	139	180	319
1976	169	195	364
1972-76	696	1075	1771

Tabelle 4.6: Anzahl Unfälle mit Verletzten 1972 - 1976 für die Busflotte der VBZ

Jahr	Trolleybus			Autobus			Busbetrieb		
	Unfälle	Verletzte	Tote	Unfälle	Verletzte	Tote	Unfälle	Verletzte	Tote
1972	113	160	-	139	156	-	252	316	-
1973	126	166	-	150	188	-	276	354	-
1974	128	169	1	182	199	-	310	368	1
1975	154	206	-	118	125	-	272	331	-
1976	166	198	-	113	130	-	279	328	-
1972-76	687	899	1	702	798	-	1389	1697	1

Die durchschnittlichen Unfallraten für den öffentlichen Verkehr lauten somit:

$$r_{241} = \frac{1771}{53,837} = 33 \text{ Unfälle mit Sachschaden/1 Mio. Fzkm}$$

$$r_{242} = \frac{1389}{53,837} = 26 \quad " \quad " \quad \text{Verletzten/} \quad "$$

$$r_{243} = \frac{1}{53,837} = 0,02 \quad " \quad " \quad \text{Toten/} \quad "$$

Um die Unfallfolgekosten pro Fahrzeugkilometer zu berechnen, stützen wir uns auf die Ergebnisse ab, die Ballmer (1975) für das Jahr 1972 ermittelt hat. Pro Sachschaden ist, inklusive Kosten für den Ausgleichsprozess, nach seinen Untersuchungen mit 2414 Franken zu rechnen. Eine Aufwertung auf die Preisbasis 1975 (Index der Konsumentenpreise) ergibt ca. 3000 Franken.

Die Kosten pro Verletzten setzen sich zusammen aus den Heilanstaltskosten, den Aufwendungen für ärztliche und zahnärztliche Behandlung, für Medikamente sowie den Kosten für Arbeitszeitausfälle (inkl. Freiheitsstrafen). Diese Kosten, von Ballmer auf gesamtschweizerischer Basis bestimmt, können nicht ohne weiteres übernommen werden; denn es wird unterstellt, dass Altersaufbau, Erwerbsquote und das Verhältnis Leicht- zu Schwerverletzte in der Stadt Zürich dem schweizerischen Mittel entspricht. Eine Ueberprüfung der Unfallstatistik zeigt, dass diese Voraussetzungen näherungsweise erfüllt sind. Die Kosten pro Verletzten ergeben sich somit zu 9924 · 1,25 = Fr. 12'400.--.

Die Kosten pro Unfall mit Getöteten belaufen sich nach Ballmer (Bruttoertragswertprinzip) auf 460'000 Franken. Ein Vergleich der Altersverteilung der Getöteten in der Stadt Zürich und der von Ballmer verwendeten zeigt, dass dieser Wert für Zürich zu hoch liegt. Im Sinne einer vorsichtigen Schätzung und in Anbetracht des relativ geringen Einflusses, den die Unfälle mit Getöteten auf die Unfallfolgekosten ausüben, setzen wir diese pro Unfall auf 400'000 Franken fest.

Im Individualverkehr zeigt das Unfallgeschehen, bezogen auf 1 Mio. Fzkm, folgendes Bild:

Tabelle 4.7: Aufteilung der Unfälle im Individualverkehr pro 1 Mio. Fahrzeugkilometer

Unfall mit	Anzahl		
	Unfälle	Verletzte	Tote
Sachschaden	20	-	-
Verletzten	3,2	3,7	-
Toten	0,04	ca 0,05	0,04

Da die Unfallfolgekosten pro Unfall mit Verletzten

$$3000 + \frac{3,7}{3,2} \cdot 1,25 \cdot 9924 = 17'500 \text{ Franken}$$

betragen, ergeben sich die Unfallkosten pro PW-Kilometer

$$c_{14} = \frac{20 \cdot 3000 + 3,2 \cdot 17'500 + 0,04 \cdot 400'000}{1'000'000} = 0,13 \text{ Fr./km}$$

Für das öffentliche Verkehrsmittel erhalten wir, ausgehend von den Tabellen 4.5 und 4.6, folgende Unfallzahlen:

Tabelle 4.8: Aufteilung der Unfälle im Kollektivverkehr pro 1 Mio. Fahrzeugkilometer

Unfall mit	Anzahl		
	Unfälle	Verletzte	Tote
Sachschaden	33	-	-
Verletzten	26	32	-
Toten	0,02	ca 0,02	0,02

Setzen wir den durchschnittlichen Sachschaden pro Unfall mit öffentlichem Verkehrsmittel doppelt so hoch an wie bei Unfällen im Individualverkehr, dann erhalten wir $\frac{3000 + 6000}{2} = 4500$ Franken, und die Kosten pro Unfall mit Verletzten berechnen

sich zu $4500+\frac{32}{26}\cdot 1{,}25\cdot 9924$ = ca. 20'000 Franken. Die Unfallfolgekosten pro Buskilometer errechnen sich somit auf

$$c_{24} = \frac{33\cdot 4500 + 26\cdot 20000 + 0{,}02\cdot 400000}{1\ 000\ 000} = 0{,}68 \text{ Fr./km.}$$

Damit liegen alle für die numerische Berechnung notwendigen Angaben vor.

44. Numerisches Beispiel

In diesem Abschnitt wollen wir die Einflüsse, die von den verschiedenen Kostenarten auf die Verkehrsteilung ausgehen, an einem Beispiel darstellen. Für die Produktionsfunktion gelten weiterhin die in Abschnitt 215 gewählten Parameterwerte, für die einzelnen Kostenarten die in Kapitel 3 und Abschnitt 43 getroffenen Annahmen. Die Berechnungen werden mit dem um die Kostengleichung erweiterten Programm durchgeführt, das bereits für die Bestimmung der Isoquanten Verwendung fand.

441. Reiner Individualverkehr

In Tabelle 4.9 sind die Durchschnittskosten in Franken pro Personenkilometer zusammengefasst, die sich bei unterschiedlicher Berücksichtigung oder Gewichtung der einzelnen Kostenarten ergeben:

Tabelle 4.9: Durchschnittskosten in Franken pro Personenkilometer bei reinem Individualverkehr

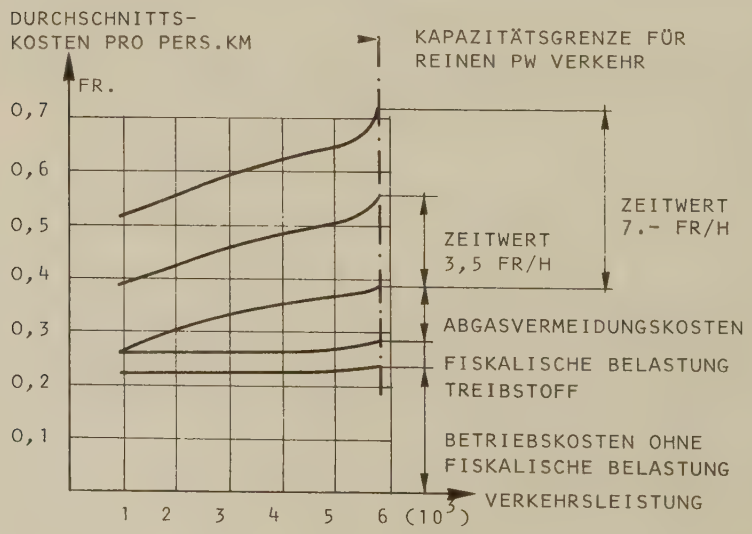
y_1	V	Z=0 -A, -F	Z=0 -A, +F	Z=0 +A, +F	Z=3.50 +A, +F	Z=7.-- +A, +F
10	896	0.218	0.257	0.257	0.385	0.513
20	1768	0.218	0.257	0.283	0.413	0.543
30	2594	0.219	0.258	0.319	0.450	0.581
40	3352	0.220	0.259	0.337	0.470	0.603
50	4327	0.222	0.261	0.353	0.490	0.627
70	5067	0.224	0.265	0.364	0.507	0.649
85	5549	0.228	0.270	0.374	0.524	0.671
95	5724	0.231	0.274	0.380	0.537	0.694
105	5789	0.234	0.279	0.386	0.552	0.717

Die Angaben im Tabellenkopf haben folgende Bedeutung:

-: nicht berücksichtigt
+: berücksichtigt
A: Abgasvermeidungskosten
F: Fiskalische Belastung Treibstoff
Z: Zeitwert in Franken pro Stunde

Der Verlauf der Durchschnittskosten ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

Abbildung 4.1: Verlauf der Durchschnittskosten pro Personenkilometer bei reinem Individualverkehr



Wie man sieht, macht sich der Einfluss der Verkehrsballung bei den untersten beiden Kurven erst bei einer Kapazitätsauslastung von etwa 80 % bemerkbar. Die Durchschnittskosten nehmen relativ stark zu, wenn die Abgasvermeidungskosten ebenfalls berücksichtigt werden (mittlere Kurve). Die obersten Kurven machen den Einfluss des unterschiedlichen Zeitwertes (3,50 bzw. 7.-- Fr./h) sichtbar, der sich im obersten Kapazitätsbereich in einer starken Zunahme der Durchschnittskosten äussert. Dies zeigt sich auch im Verlauf der auf die Verkehrsleistung bezogenen Grenzkosten in Tabelle 4.10 (Fr./Pers.km).

Tabelle 4.10: Verlauf der Grenzkosten bei reinem Individualverkehr, in Franken pro Personenkilometer

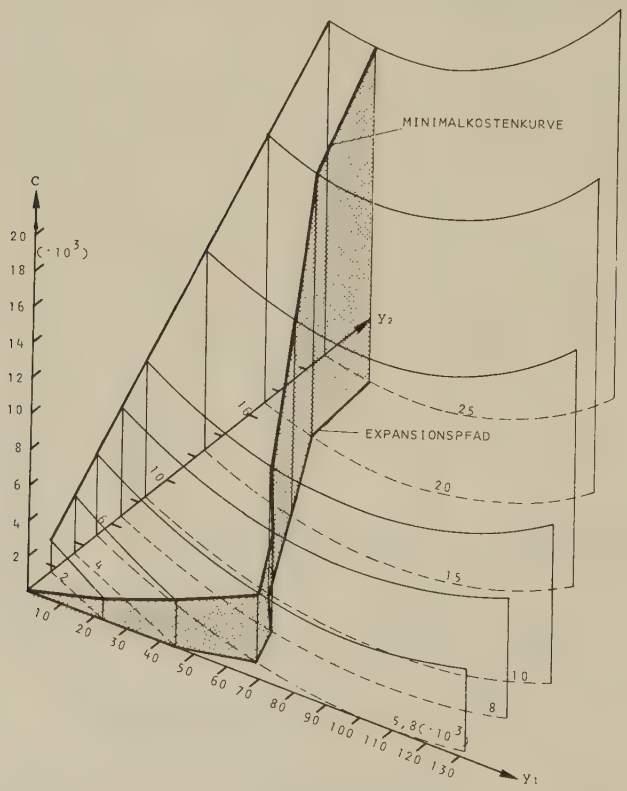
y_1	Z=0 -A, -F	Z=0 -A, +F	Z=0 +A, +F	Z=3.50 +A, +F	Z=7.-- +A, +F
10	0.22	0.26	0.31	0.44	0.57
20	0.22	0.26	0.39	0.53	0.66
30	0.22	0.26	0.40	0.54	0.68
40	0.23	0.27	0.41	0.55	0.70
50	0.24	0.27	0.42	0.58	0.74
60	0.24	0.29	0.43	0.62	0.80
70	0.26	0.31	0.46	0.68	0.90
80	0.27	0.34	0.50	0.77	1.05
85	0.31	0.38	0.54	0.87	1.20
90	0.34	0.44	0.63	1.07	1.49
95	0.46	0.61	0.78	1.41	2.07
100	0.79	1.57	1.42	2.89	4.32
105					

442. Individuelle und öffentliche Verkehrsmittel

Das Vorgehen zur numerischen Berechnung der kostenminimalen Verkehrsteilung ist aus Abbildung 4.2 ersichtlich. Für jede in der y_1-y_2-Ebene gestrichelt dargestellte Isoquante werden punktweise die Kosten berechnet und parallel zur C-Achse aufgetragen. Die Minimalkostenkurve verbindet alle Punkte auf der Gesamtkostenfläche, die bei einer gegebenen Verkehrsleistung minimale Gesamtkosten verursachen. Die Vertikalprojektion dieser Kurve in die y_1-y_2-Ebene führt zum Expansionspfad, der alle effizienten Faktorkombinationen als Funktion der Verkehrsleistung angibt.

Ist die Zeitpräferenz der Verkehrsteilnehmer Null, so fällt der Expansionspfad unabhängig davon, ob mit oder ohne fiskalische Belastungen und Abgasvermeidungskosten gerechnet wird, mit der y_2 Achse zusammen.

Abbildung 4.2: Minimalkostenkurve und Expansionspfad



Die Gesamtkostenkurve in Abbildung 4.2 degeneriert zu einer Geraden in der C-y_2 Ebene. Solange sich die einzelnen Busse nicht gegenseitig beeinflussen, ist nämlich die Reisegeschwindigkeit des Busses konstant, und Gleichung 4.12 kann als Linearkombination von C und y_2 geschrieben werden:

$$C = c_{130}\,\frac{b^2}{2} + (TE_8 v_2 + TE_9)\,y_2$$

Der Einfluss wachsender Zeitpräferenz (= steigenden Zeitwertes) auf die Durchschnittskosten in Fr./Pers.km bei Berücksichtigung der Abgasvermeidungskosten und der fiskalischen Belastung des Treibstoffes ist aus der Tabelle 4.11 ersichtlich. Die Werte oberhalb der gestrichelten Linie geben den Bereich an, wo die Verkehrsleistung kostenminimal ausschliesslich durch Personenwagen erbracht wird.

Tabelle 4.11: Verlauf der Durchschnittskosten in Franken pro Personenkilometer als Funktion der Verkehrsleistung und unter Berücksichtigung der fiskalischen Belastung sowie der Abgasvermeidungskosten

V	Z=0	Z=3.5	Z=7	Z=10.5	Z=14
1000	0.199	0.385	0.512	0.641	0.771
2000	0.199	0.427	0.556	0.685	0.815
3000	0.199	0.461	0.591	0.725	0.856
4000	0.199	0.467	0.618	0.753	0.889
5000	0.199	0.468	0.648	0.789	0.930
5800	0.199	0.468	0.697	0.881	1.059
8000	0.199	0.469	0.715	0.932	1.145
10000	0.199	0.470	0.724	0.959	1.191
12500	0.199	0.471	0.732	0.981	1.227
15000	0.199	0.472	0.737	0.996	1.251
17500	0.199	0.473	0.741	1.006	1.269
20000	0.199	0.474	0.744	1.014	1.282

In Abbildung 4.3 ist der Gesamtkostenverlauf sowie der Anteil des Individualverkehrs und des öffentlichen Verkehrs an den Gesamtkosten für einen Zeitwert von 7.-Fr./Stunde aufgezeichnet. Bis zur Kapazitätsgrenze für reinen Individualverkehr von etwa 5800 Pers.km/Stunde nehmen die Grenzkosten zu und ergeben eine gekrümmte Gesamtkostenkurve ; die Verkehrsleistung wird ausschliesslich mit individuellen Verkehrsmitteln erbracht. Eine Ausweitung der Verkehrsleistung über diese Kapazitätsgrenze hinaus ist nur durch einen erzwungenen Modal - Split möglich. Die Gesamtkosten nehmen für Verkehrsleistungen zwischen 5800 und ca. 17'500 Pers.km/Stunde linear zu, d.h. die Grenzkosten sind in diesem Bereich konstant.

Abbildung 4.3: Aufteilung der Gesamtkosten auf den Individual- und öffentlichen Verkehr für einen Zeitwert von 7.- Fr./Stunde

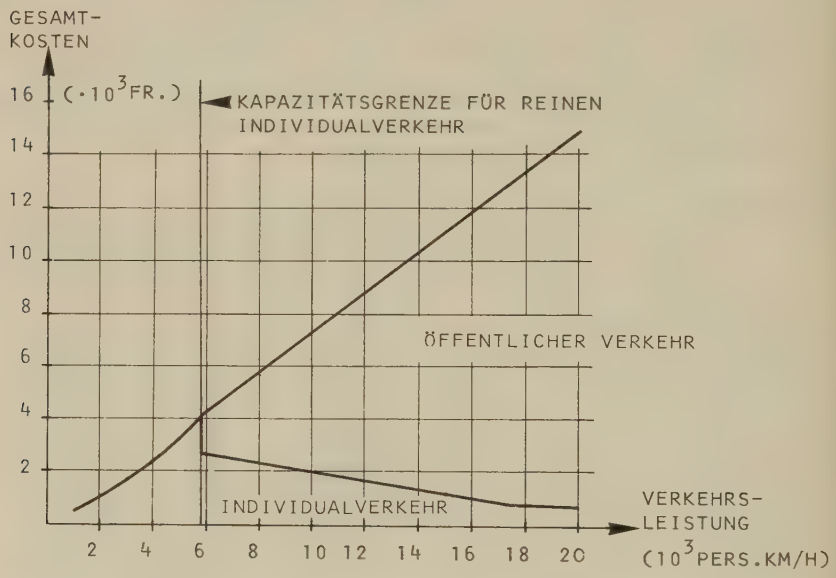
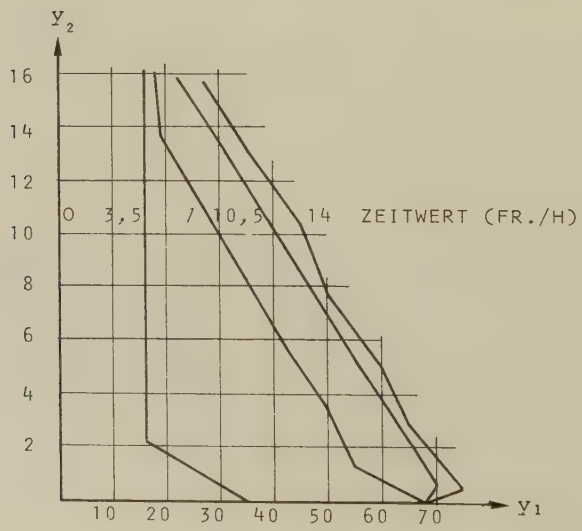
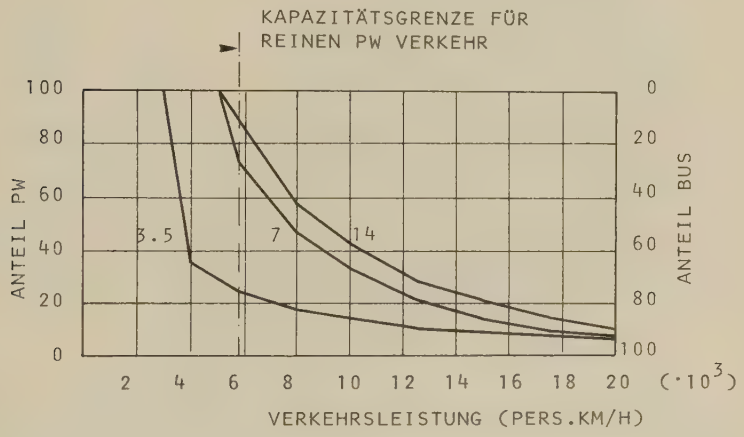


Abbildung 4.4: Expansionspfad in Abhängigkeit des Zeitwertes. Abgasvermeidungskosten und fiskalische Belastung des Treibstoffes berücksichtigt



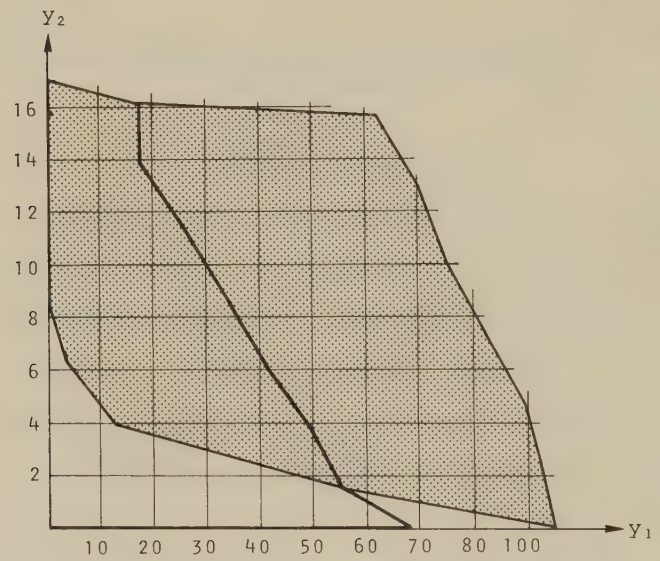
In Abbildung 4.4 sind die Expansionspfade aufgezeichnet, und Abbildung 4.5 zeigt, wie sich die Verkehrsleistung auf die beiden Verkehrsmittel aufteilt.

Abbildung 4.5: Aufteilung der Verkehrsleistung auf die beiden Verkehrsmittel in Funktion des Zeitwertes



Beide Abbildungen lassen erkennen, dass Zeitwerte unter 7 Fr./h den grössten Einfluss auf die Verkehrsteilung haben. Allerdings dürfen diese Aussagen nicht überbewertet werden, denn im ökonomisch effizienten Bereich (innerhalb der Kammlinien) verlaufen die Kostenkurven über den Isoquanten relativ flach. Dies wird in Abbildung 4.6 demonstriert. Sie zeigt, wie sich der Expansionspfad verschiebt, wenn die Gesamtkostenfläche mit der über der Isoquante und parallel zur y_1-y_2-Ebene liegenden Kurve durchstossen wird, deren Kosten um 5 % über den Minimalkosten liegen.

Abbildung 4.6: Streubereich des Expansionspfades, wenn Faktorkombinationen mit 5 % höheren Kosten betrachtet werden



Es zeigt sich, dass für hohe Zeitpräferenzen der alleinige Einsatz von Personenwagen bis nahe an die Kapazitätsgrenze des Verkehrsträgers die niedrigeren Gesamtkosten verursacht als jede andere Faktorkombination. Dies ist auf die langen Kursfolgezeiten und den sich daraus ergebenden hohen Kosten der Wartezeit zurückzuführen, da wir unterstellt haben, dass die Wartezeit die Hälfte der Kursfolgezeit beträgt. Diese Annahme ist für sehr kleine y_2 nicht zutreffend, da bei Kursfolgezeiten über ca. 10 Minuten die Pendler sich auf die Fahrplanzeiten auszurichten beginnen (Walther (1973, S. 125)).

Tabelle 4.12 zeigt den Einfluss der Abgasvermeidungskosten auf die Verkehrsteilung für Zeitwerte von 3.50 und 7 Fr./Stunde.

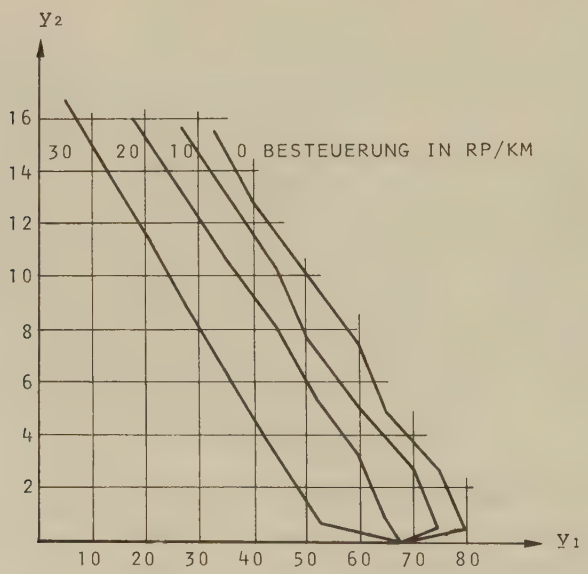
Tabelle 4.12: Einfluss der Abgasvermeidungskosten auf die Verkehrsteilung

V	Z = 3.5				Z = 7			
	+F, -A		+F, +A		+F, -A		+F, +A	
	y_1	y_2	y_1	y_2	y_1	y_2	y_1	y_2
1000	11.2	0	11.2	0	11.2	0	11.2	0
2000	22.8	0	22.8	0	22.8	0	22.8	0
3000	35.3	0	35.3	0	35.3	0	35.3	0
4000	49.6	0	16	2.2	49.6	0	49.6	0
5000	68.4	0	16	3.0	68.4	0	68.4	0
5800	65	0.9	16	3.7	75	0.5	55	1.3
8000	60	3.1	16	5.6	70	2.8	50	3.6
10000	50	5.4	16	7.3	62.5	5	42.5	5.8
12500	45	7.9	16	9.5	55	7.6	35	8.4
15000	36	10.6	16	11.7	45	10.3	27	11
17500	28	13.3	16	13.9	38	12.9	19	13.7
20000	20	15.9	16	16.1	28	15.6	18	16

Da die Abgasvermeidungskosten erst ab y_1-Werten von 16 anfallen, erfolgt bei einem Zeitwert von 3.5 Fr./Stunde praktisch eine vollständige Internalisierung dieses externen Effektes, während bei einem Zeitwert von 7 Fr./Stunde der Einfluss auf die Verkehrsteilung nicht mehr so ausgeprägt ist und mit zunehmendem Zeitwert noch weiter abflacht.

Zum Abschluss wollen wir, vor allem im Hinblick auf verkehrspolitische Fragestellungen, den Einfluss von Personenwagenkilometergebühren, von Geschwindigkeitsbeschränkungen und von einer Aenderung des Besetzungsgrades des öffentlichen Verkehrsmittels auf die Verkehrsteilung aufzeigen. In Abbildung 4.7 ist der Einfluss unterschiedlicher Gebühren dargestellt, wobei sowohl die Abgasvermeidungskosten als auch die fiskalische Belastung des Treibstoffes unberücksichtigt bleiben und der Zeitwert mit 7 Fr./Stunde eingesetzt wird.

Abbildung 4.7: Einfluss einer Personenwagen - Kilometerbesteuerung auf den Expansionspfad, ohne Berücksichtigung von Abgasvermeidungskosten und fiskalischer Belastung

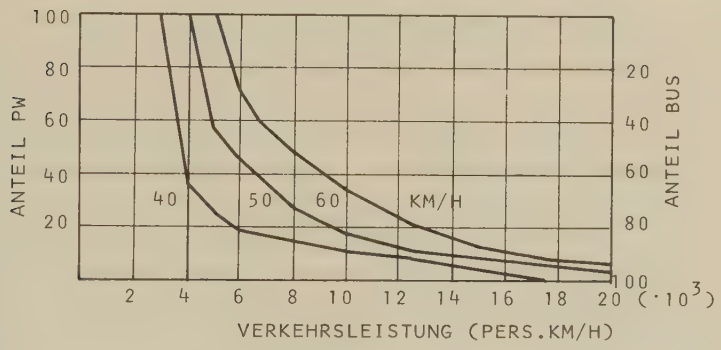


Ein Vergleich mit Abbildung 4.4 zeigt, dass ein Zeitwert von Fr. 10.50 mit Berücksichtigung der fiskalischen Belastung des Treibstoffes und der Abgasvermeidungskosten etwa die gleiche Verkehrsteilung bewirkt wie eine Besteuerung von 20 Rp./PW-Kilometer, und dass bei gleichem Zeitwert von 7 Fr./Stunde eine Besteuerung von 30 Rp./PW-Kilometer etwa dieselbe Wirkung zeigt wie die Berücksichtigung von Abgasvermeidungskosten und fiskalischer Belastung ohne Steuer. Der Modal Split im Bereich bis 5000 Pers.km/Stunde wird auch durch eine Besteuerung von 30 Rp./PW-Kilometer nicht beeinflusst.

Der Einfluss einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf die Verkehrsteilung wird wiederum unter Berücksichtigung von Abgasvermeidungskosten und fiskalischer Belastung aufgezeigt. Aus-

gehend von der ursprünglich gültigen Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h zeigt Abbildung 4.8 den Einfluss einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf 50 bzw. 40 km/h auf.

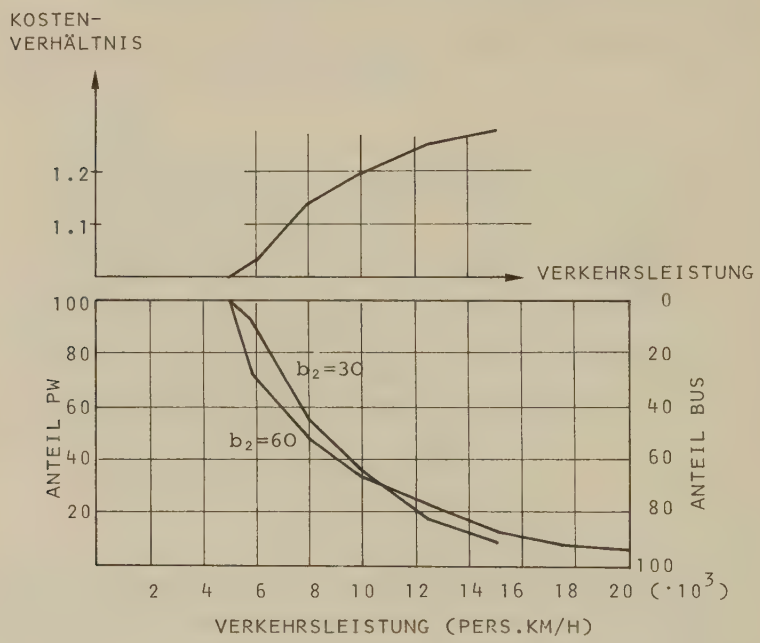
Abbildung 4.8: Einfluss von Geschwindigkeitsbeschränkungen auf die Verkehrsteilung (Zeitwert 7 Fr./h)



Wie man sieht, kann durch diese Massnahme die kostenminimale Verkehrsteilung wesentlich beeinflusst werden. Allerdings muss festgehalten werden, dass gegenüber dem Ausgangszustand höhere Gesamtkosten anfallen, die z.B. bei einer Verkehrsleistung von 3000 Pers.km/h und einer Beschränkung der Höchstgeschwindigkeit auf 40 km/h etwa 30 % ausmachen.

Die Auswirkung eines kleinen Besetzungsgrades des öffentlichen Verkehrsmittels ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Der Ausgangszustand ist gleich wie bei der Geschwindigkeitsbeschränkung, der Besetzungsgrad b_2 wird von 60 auf 30 reduziert.

Abbildung 4.9: Einfluss des Besetzungsgrades des öffentlichen Verkehrsmittels auf die Verkehrsteilung



Bis zu einer Verkehrsleistung von 5000 Pers.km/Stunde ist der Personenwagen in beiden Fällen das kostengünstigere Verkehrsmittel, zwischen 5000 und ca. 10'000 Pers.km/Stunde ist der PW-Anteil an der Verkehrsleistung bei kleinerem Besetzungsgrad grösser, über 10'000 Pers.km/Stunde kleiner als der Bus-Anteil. Abbildung 4.9 lässt auch folgende Interpretation zu: Wird das Angebot an öffentlichen Verkehrsmitteln schlecht ausgelastet, so sinkt einerseits die Kapazität des Verkehrsträgers von ca. 30'000 auf 17'500 Pers.km/Stunde ab, und die Gesamtkosten nehmen relativ stark zu. Das Verhältnis der Gesamtkosten ist in Abbildung 4.9 über der Verkehrsleistung aufgetragen.

5. Massnahmen zur Beeinflussung der Verkehrsteilung

Bevor in diesem Kapitel auf die Diskussion einiger Massnahmen zur Beeinflussung der Verkehrsteilung eingegangen wird, wollen wir die wichtigsten Voraussetzungen und Ergebnisse der bisherigen Arbeit zusammenfassen.

Der von uns untersuchte Verkehrsträger ist Bestandteil eines bestehenden Korridors, der die Verbindung zwischen den ausserhalb der Stadt liegenden Wohn- mit den sich hauptsächlich in der City befindlichen Arbeitsplätzen herstellt. Für die Befriedigung der Verkehrsnachfrage stehen zwei Verkehrsmittel zur Verfügung, die sich vor allem in der Reisegeschwindigkeit und im Besetzungsgrad unterscheiden. Die Gültigkeit der in Abschnitt 2133 hergeleiteten Produktionsfunktion ist auf diesen - z.B. durch eine koordinierte Lichtsignalregelung bevorzugten - Abschnitt begrenzt, da im innerstädtischen Strassennetz mit gleichwertigen Querbeziehungen andere Gesetzmässigkeiten im Verkehrsablauf massgebend werden. Die Monetarisierung der Verkehrskosten mussten wir auf einige - zumindest in ihrer Grössenordnung erfassbare - Kostenarten beschränken. Bei den Aufwendungen für den Verkehrsträger wurden nur jene Kosten in die Berechnung einbezogen, welche mit dem Betrieb eines bestehenden Strassenabschnittes anfallen. Die vom individuellen Verkehrsmittel verursachten Kosten des ruhenden Verkehrs blieben bisher ebenfalls unberücksichtigt. Ihr Einfluss auf die kostenminimale Verkehrsteilung soll in diesem Kapitel diskutiert werden.

Wir wollen an der zu Beginn dieser Arbeit formulierten Annahme festhalten und die Verkehrsleistung weiterhin als exogene Grösse betrachten. Die Massnahmendiskussion ist demzufolge nicht auf eine Beurteilung städtischer Entwickungsalternativen ausgerichtet, wie dies z.B. Iblher (1972) oder Richrath (1974) versuchen, sondern beschränkt sich in erster Linie auf

die Massnahmen zur Beeinflussung der Verkehrsteilung. Dabei sind wir uns bewusst, dass diese Massnahmen die verkehrsbestimmenden Faktoren beeinflussen können. Auf die mit grosser Wahrscheinlichkeit zu erwartenden Rückwirkungen wird an entsprechender Stelle hingewiesen.

51. Bestimmungsgrössen der Verkehrsmittelwahl

Die Entscheidung des Verkehrsteilnehmers über das zu wählende Verkehrsmittel wird nicht nur von den Faktorkosten beeinflusst. Eine Reihe weiterer Faktoren, die in den Verkehrskosten nur teilweise zum Ausdruck kommen, sind für die Verkehrsmittelwahl ebenso bedeutsam. Im Hinblick auf den Einsatz verkehrspolitischer Massnahmen und die Beurteilung ihrer Wirksamkeit wollen wir die wichtigsten Einflussgrössen kurz darstellen.

Vorerst ist festzuhalten, dass die vom Verkehrsteilnehmer zu tragenden Fahrkosten nicht mit den von uns berechneten Verkehrskosten übereinstimmen. Diese Diskrepanz ist auf verschiedene Ursachen zurückzuführen: Die Abgasvermeidungskosten werden von ihm solange nicht wahrgenommen, als für die Verursachung dieses externen Effektes keine Zahlungen geleistet werden müssen. Die Betriebskosten des Verkehrsträgers und die Unfallfolgekosten fallen, von den fiskalischen Belastungen des Treibstoffes abgesehen, jährlich in Form von Motorfahrzeugsteuern und Versicherungsprämien an. Es handelt sich somit um Kosten, die mit dem Fahrzeugbesitz zusammenfallen und in bezug auf die Fahrleistung fix sind. Dasselbe gilt für die Zinskosten und den altersabhängigen Abschreibungsbedarf, den wir in Abschnitt 31 mit 50 % angenommen haben. Wie bei den Reparatur- und Unterhaltskosten liegen zudem Aufwand (Güterverzehr) und Ausgabe zeitlich so weit auseinander, dass das "Kostenempfinden" stark beeinträchtigt wird. Es ist deshalb anzunehmen, dass viele Fahrzeugbesitzer bei der Verkehrsmittel-

wahl bestenfalls die variablen privaten Durchschnittskosten oder sogar nur die privaten Grenzkosten berücksichtigen.

Ist die Verfügbarkeit über ein eigenes Fahrzeug gegeben, d.h. befindet sich der Verkehrsteilnehmer in der Entscheidungssituation privat oder öffentlich zu fahren, dann ist die Wahl des Verkehrsmittels unter anderem auch vom Besitz eines Abstellplatzes oder der Wahrscheinlichkeit, einen solchen in der Nähe des Arbeitsplatzes zu finden, abhängig. Der Parkplatz ist ökonomisch gesehen ein Komplementärgut und kann deshalb als Anknüpfungspunkt für verschiedene Massnahmen verwendet werden.

Die Wahl des Verkehrsmittels wird ausser der Verfügbarkeit über ein eigenes Verkehrsmittel und einer Parkierungsmöglichkeit aber auch von verkehrsmittelabhängigen Merkmalen beeinflusst. Zu ihnen sind die örtliche und zeitliche Verfügbarkeit, die Bequemlichkeit (Sitzplatzangebot, Beförderung von Gepäck usw.), Pünktlichkeit, Regelmässigkeit, Häufigkeit u.a. zu zählen. Da sie mit der quantitativen Messgrösse Personenkilometer nicht erfassbar sind, werden sie auch als Qualitätsparameter (Baum (1972, S. 50)) bezeichnet.

Schliesslich sind auch sozio-ökonomische Bedingungen für die Nachfrageverteilung massgebend. Untersuchungen von Deckert (1971) haben gezeigt, dass das Einkommen zwar für den Fahrzeugbesitz von Bedeutung ist, die Nutzungsintensität für Fahrten auf dem Arbeitsweg hingegen nicht von der Einkommenshöhe abhängt. Verkehrsteilnehmer mit höherem sozialem Status sind sogar eher geneigt, auf die Benützung des individuellen Verkehrsmittels im Pendlerverkehr zu verzichten. Einfluss auf die Wahl des Verkehrsmittels haben auch die Stellung im Berufsleben, Alter, Geschlecht und Familienstand. Da diese Merkmale vom verkehrspolitischen Standpunkt aus wenig ergiebig sind, wird nicht weiter auf sie eingegangen.

52. Diskussion einiger Massnahmen

Wir werden uns im folgenden auf die Diskussion von Massnahmen beschränken, deren kostenmässige Auswirkungen mit unserem Modell abgeschätzt werden können.

521. Ausgangslage

Wie wir im 4. Kapitel gesehen haben, ist die sich in den Zeitkosten niederschlagende Zeitpräferenz ausschlaggebend für den kostenminimalen Modal Split. Bei einem Zeitwert von Fr. 7.--/ Stunde ist der Einsatz von Personenwagen bis nahe an die Kapazitätsgrenze des Verkehrsträgers kostengünstiger, so dass die Frage gestellt werden muss, ob sich überhaupt Massnahmen zur Aenderung der Verkehrsteilung aufdrängen, solange die Verkehrsleistung allein mit individuellen Verkehrsmitteln erbracht werden kann. Sofern nur die Fahrten innerhalb des Korridors (bis zum Cityrand) betrachtet und die Kosten des ruhenden Verkehrs vernachlässigt werden, ist die Frage bei hoher Zeitpräferenz mit ja zu beantworten. In der City, wo das Strassennetz neben der Durchleitungs- auch Sammel- und Erschliessungsfunktion zu erfüllen hat, trifft dies nicht mehr zu, weil die Leistungsfähigkeit des Verkehrsträgers einerseits durch die Netzverflechtungen (Kreuzungen), andererseits durch die genannten Zusatzfunktionen stark beeinträchtigt wird. Sollen die Verhältnisse im Zielbereich des Pendlerverkehrs verbessert oder stabilisiert werden, so müssen die Massnahmen bereits ausserhalb der City zu einer wirksamen Entlastung des Strassennetzes in den Spitzenzeiten führen.

522. Beeinflussung von Parametern der Produktionsfunktion

Beim individuellen Verkehrsmittel stehen hier zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Durch eine Erhöhung des Besetzungsgra-

des kann die maximale Verkehrsleistung bei praktisch unveränderten Betriebskosten ohne Schwierigkeiten verdoppelt werden (b_1 von 1,5 auf 3 Personen/Fahrzeug erhöhen). Diese "car pools" haben in den USA bereits erhebliche Popularität erreicht, weil in einer Reihe von Städten an zahlreichen Brücken und Ausfallstrassen Gebühren erhoben werden, die Fahrzeuge mit nur einem Insassen benachteiligen. Staatliche Behörden unterstützten zudem die Vermittlung passender Partner und viele private Unternehmen bevorzugen bei der Vergabe von Firmenparkplätzen die Fahrgemeinschaften (Böttcher (1976, S. 213)). In der Schweiz konnten noch keine langfristigen Erfahrungen mit Fahrgemeinschaften gesammelt werden. Die während der Oelkrise von einer Tageszeitung in Zürich aufgebaute Vermittlungsstelle wurde nach kurzer Zeit wieder aufgehoben, weil die Nachfrage nach Partnern anscheinend nicht das erhoffte Ausmass erreichte und die Situation auf dem Treibstoffmarkt sich in relativ kurzer Zeit wieder normalisierte. Der grösste Nachteil der Fahrgemeinschaften ist sicherlich in der Einschränkung der zeitlichen Verfügbarkeit über das eigene Fahrzeug zu sehen.

Die zweite Möglichkeit besteht in einer Senkung der Höchstgeschwindigkeit. Damit wird das Verhältnis von reiner Fahr - zu Reisezeit beim individuellen im Vergleich zum öffentlichen Verkehrsmittel verschlechtert, was bei einer hohen Zeitpräferenz zwar die relative Stellung des öffentlichen Verkehrsmittels verbessert, insgesamt aber zu höheren Kosten führt. Die Wirkung dieser Massnahme verschwindet, sobald aus verkehrstechnischen Gründen die Geschwindigkeit unter das vorgeschriebene Mass fällt. Eine zeitliche Differenzierung ist erforderlich, wenn der Verkehr ausserhalb der Spitzenzeiten nicht unnötigerweise behindert werden soll. Eventuell werden die zusätzlich erwachsenden Zeitkosten - zumindest teilweise - durch abnehmende Unfallfolgekosten kompensiert, was als positiver Sekundäreffekt dieser Massnahme zu berücksichtigen ist.

Beim öffentlichen Verkehrsmittel stehen theoretisch mehrere Parameter zur Diskussion, die aber aus betrieblichen Gründen nur marginale Aenderungen zulassen. Der grösste Nachteil des öffentlichen Verkehrsmittels, die Haltestellenaufenthaltszeit, kann nur durch bessere Ein- und Ausstiegsmöglichkeiten, d.h. praktisch bei Neubeschaffung von Rollmaterial, in bestimmten Grenzen abgebaut werden. Einer Vergrösserung des Haltestellenabstandes stehen die grösseren Anmarschwege entgegen, welche zu höheren Zeitkosten und damit sinkender Attraktivität des öffentlichen Verkehrsmittels führen. Höhere Beschleunigungs- und Verzögerungswerte beeinflussen die Fahrzeit nicht entscheidend, vermindern aber den Fahrkomfort wesentlich und erhöhen das Verletzungsrisiko der Fahrgäste. Die Reisegeschwindigkeit kann bedeutend erhöht werden, wenn in den Korridoren Direktverbindungen zwischen den Hauptzentren der Wohn- und Arbeitsquartiere eingeschaltet werden und/oder dem öffentlichen Verkehrsmittel ein eigener Fahrstreifen zugewiesen wird. Beide Möglichkeiten verursachen dem öffentlichen Verkehr zusätzliche Kosten: Die "Busbrücke", weil für die zwischen Vorort und City wohnenden bzw. arbeitenden Verkehrsteilnehmer trotzdem ein minimales Verkehrsangebot aufrechterhalten werden muss; der eigene Fahrstreifen, weil dadurch die Betriebskosten des Verkehrsträgers nun allein vom Bus zu tragen sind. Eine kostenmässige Beurteilung ist mit unserem Modell nicht durchführbar.

523. Investitionspolitische Massnahmen

Wird die maximale Verkehrsleistung für den Individualverkehr erreicht, so ist neben der von uns behandelten Substitution auch ein Ausbau der Infrastruktur denkbar. Dieser Fall kann in unserem Modell durch Ergänzung der Unterhaltskosten des Verkehrsträgers mit den Zinskosten und Abschreibungen berücksichtigt werden. Gehen wir von den in Abschnitt 432 berechneten Kosten aus und werten wir sie mit dem Verhältnis der Ge-

samt- zu den Unterhaltskosten gemäss Esta (578, S. 61) auf, so erhalten wir:

	Betriebskosten Verkehrsträger	Verhältnis Strassen- zu Betriebskosten (nach Esta)	Gesamte Strassenkosten
PW	3 (Rp./km)	6,8	ca. 21 (Rp./km)
Bus	32 (Rp./km)	3,4	ca. 109 (Rp./km)

Diese gesamtschweizerischen Durchschnittswerte der Kategorienrechnung sind wahrscheinlich viel zu niedrig, um den überdurchschnittlichen Investitionskosten in städtischen Verhältnissen Rechnung zu tragen. Vergleichen wir die Substitutions- mit der Investitionslösung, so wird in unserem Modell (bei einem Zeitwert von Fr. 7.--/Stunde) je nach Verkehrsleistung die Kostengleichheit bei einer Belastung zwischen 30 und 50 Rp./PWkm erreicht. Berücksichtigen wir die zusätzlichen Stauungskosten im Citybereich sowie die zusätzlich entstehenden externen Effekte durch Lärm und Abgase, so kann vermutet werden, dass ein weiterer Ausbau der Strasseninfrastruktur mindestens so teuer zu stehen kommt wie die substitutive Nutzung des bestehenden Netzes durch leistungsfähigere Verkehrsmittel.

Investitionspolitische Massnahmen sind aber auch beim öffentlichen Verkehrsmittel möglich. Für die Umlenkung des Individualverkehrs auf die öffentlichen Verkehrsmittel besitzen kleine Busse einige Vorteile: Kürzere, wendigere Busse gestatten einen homogeneren Verkehrsfluss und führen bei einem bestimmten Verkehrsleistungsangebot zu kleineren Kursfolgezeiten, welche insbesondere bei kleinem Angebot für die Zeitkosten ausschlaggebend werden. Zudem erlauben kleinere Busse eher die Einrichtung einer gesonderten Busspur (Hollatz (1965, S. 131 und 239)). Nachteilig wirken sich die mit sinkender Platzzahl steigenden Personal- und Betriebskosten des Verkehrsmittels aus. Für London, wo Busse fast drei Viertel aller

Strassenfahrten bewältigen, hat Webster (1968) unter der Annahme, dass im Zentrum der gesamte Individualverkehr untersagt ist, für einen Bus mit 20 Sitzplätzen maximale Gesamtreisegeschwindigkeiten errechnet. Eine Beurteilung der Gesamtkosten ist nur unter Berücksichtigung von Wohn- und Arbeitsplatzverteilung, Linienplan des öffentlichen Verkehrsmittels usw. möglich.

524. Massnahmen beim ruhenden Verkehr

Dem ruhenden Verkehr kommt als Komplement zum fliessenden Individualverkehr grosse Bedeutung zu. Massnahmen, die beim ruhenden Verkehr ergriffen werden, wirken sich unmittelbar auf die Verkehrsmittelwahl all jener aus, die am Fahrtziel ihr Fahrzeug abstellen müssen, was - abgesehen vom Durchgangsverkehr - für alle Verkehrsteilnehmer zutrifft. Auf die Zielsetzungen der Parkplatzpolitik, die von Hottenstein (1969, S. 168) ausführlich gewürdigt werden, wollen wir hier nicht im einzelnen eingehen. Die Beeinflussung der Verkehrsteilung während der Spitzenzeiten kann (durch Einschränkungen zeitlicher und örtlicher Art sowie preispolitische Massnahmen) durch die Bewirtschaftung der sich in öffentlicher Hand befindlichen Parkflächen unterstützt werden. Bei den in Zürich gegebenen Verhältnissen, wo ca. 60 % aller Parkplätze in privatem Besitz sind, können allerdings ohne weitere Nutzungsbeschränkungen für den Berufsverkehr keine umwälzenden Auswirkungen auf die Verkehrsteilung erwartet werden. In unserem Zusammenhang ist auch von Bedeutung, dass am Rande der Strasse parkierte Fahrzeuge den Verkehrsfluss wegen mangelnder Seitenfreiheit beeinträchtigen und damit die Leistungsfähigkeit des Verkehrsträgers beeinflussen (Prigge (1968, S. 12)).

Im Zusammenhang mit der Parkraumpolitik sind auch die Bestrebungen zu erwähnen, den individuellen und öffentlichen Verkehr zu kombinieren. Die bekannteste Form stellt das Park and Ride

System dar, wo der Weg zum Arbeitsplatz teilweise mit dem eigenen Fahrzeug, der Rest mit dem öffentlichen Verkehrsmittel zurückgelegt wird. Dieses System stellt an sich eine ideale Kombination der Eigenschaften beider Verkehrsmittel dar: Die Erschliessung dispers verteilter Wohnplätze durch das individuelle, der kollektive Massentransport durch das öffentliche Verkehrsmittel. Wie Erfahrungen in Deutschland und in der Schweiz zeigen, ist dieser kombinierte Verkehr nur unter bestimmten Bedingungen erfolgversprechend, die auch aus unserem einfachen Modell abgeleitet werden können. Die Auffangparkplätze müssen an Knotenpunkten leistungsfähiger öffentlicher Verkehrslinien liegen, welche eine ebenso schnelle Weiterfahrt wie das eigene Fahrzeug ermöglichen. Die Vermeidung von langen Anmarschwegen, Warte- und Umsteigezeiten sowie günstig gelegene Innenstadthaltestellen sind für den Erfolg dieser Massnahme ausschlaggebend.

525. Preispolitische Massnahmen

Das Ziel preispolitischer Massnahmen besteht nach Willeke (1969, S. 45) hauptsächlich darin, "mit einem System preisähnlicher Belastungen die städtischen Verkehrsflächen und deren Inanspruchnahme durch den fliessenden und ruhenden Kraftverkehr zu einem Ausgleich zu bringen ". Als Subsidiärziele werden die Abgeltung eines Teils der Kosten, welche der Strassenpersonenverkehr nicht trägt, die Abgeltung von Benutzungskosten und der externen Effekte (Zeitverluste, Lärmbelästigung und Luftverunreinigung) angestrebt (Kentner (1972, S. 331)).

Smeed (1964, S. 7) hat verschiedene Kriterien aufgestellt, welchen diese Abgaben zu genügen haben. So sollen sie u.a. in engem Zusammenhang mit der Strassenbenützung stehen, eine Differenzierung nach Ort, Zeit und Verkehrsdichte zulassen, für den Benützer merklich (d.h. in die Entscheidung über das zu wählende Verkehrsmittel eingehen) sein und den Grundsatz der Wirtschaftlichkeit erfüllen.

An Instrumenten stehen Steuern, Lizenzen, sogenannte Agglometer, welche auf dem Prinzip eines Taxizählers aufbauen, aber auch verschiedene Erhebungsformen der Parkpreise sowie die Tarifpolitik öffentlicher Verkehrsunternehmen zur Verfügung. Die Steuern mit Fixkostencharakter, welche der Nutzungsintensität nicht Rechnung tragen, sind als preispolitische Instrumente vor allem kurzfristig ungeeignet (z.B. Erhöhung der Motorfahrzeugsteuern); Steuern auf Treibstoffen oder anderen Betriebsmitteln, welche zu einer Erhöhung der Betriebskosten führen, sind zeitlich und örtlich zu wenig differenzierbar oder können umgangen werden. Aehnliche Einwände gelten für Lizenzen, so dass praktisch nur die Agglometer übrig bleiben. Neben den technischen Schwierigkeiten und den relativ hohen Kosten sind hier vor allem aus politischen Gründen Zweifel an der Realisierbarkeit anzubringen. Tarifpolitische Massnahmen, die im Extremfall zur Einführung des Nulltarifes führen, haben in der Praxis nicht die erwünschte Wirkung gezeigt, so dass - zumindest kurzfristig - den preispolitischen Massnahmen im ruhenden Verkehr die grösste Erfolgschance zur Beeinflussung der Verkehrsteilung eingeräumt werden kann.

Variablenverzeichnis

a	Beschleunigung
A	Abkürzung, Gleichung 2.31
A	Abgasvermeidungskosten, Kapitel 4
b	Strassenbreite, Gleichung 3.31
b_1	Besetzungsgrad Personenwagen
b_2	Besetzungsgrad Bus
c	Konstante
c_1	Kosten pro Personenwagenkilometer
c_2	Kosten pro Buskilometer
c_{ijn}	Kosten, Indices gemäss Gleichung 3.1
C	Kostengleichung, Gleichung 4.7
d	Abstand, Gleichung 3.23
e	Flächen- und zeitbezogene Energie
E	Emissionsfunktion, Gleichung 3.32
f_1	Personenwageneinheiten/Personenwagen
f_2	Personenwageneinheiten/Bus
F	Funktionsbezeichnung, Gleichung 2.25
F	Fiskalische Belastung, Kapitel 4
G	Funktionsbezeichnung, Gleichungen 2.30 und 2.43
h	Durchschnittlicher Fahrzeugabstand
I	Schallintensität
I_0	Bezugsintensität
k	Verkehrsdichte = Fahrzeuge/Längeneinheit
k_1	Verkehrsdichte Personenwagen
k_2	Verkehrsdichte Busse
k_{12}	$k_1 + k_2$
K	Immissionskonzentration
l	Haltestellenabstand
L	Korridorlänge
L_0	Grundgeräuschpegel, Gleichung 3.30
L_l	Linearer Schallpegel
L_{eq}	Energieäquivalenter Dauerschallpegel

M	Verkehrsmenge = Fahrzeuge pro Stunde
M_1	Anzahl Personenwagen pro Stunde
M_2	Anzahl Busse pro Stunde
p	Druck
p_0	Bezugsdruck = Kraft/Fläche
p_1	Preis Gut 1
p_2	Preis Gut 2
P	Fahrzeuggewicht
Q	Akustische Leistung
r	Radius
r_{ijn}	Verbrauchsfunktionen, Gleichung 3.1
R	Reduktionsquote, Gleichung 3.33
s	Steigung der Strasse, Gleichung 3.3
t	Fahrzeit
t_0	Haltestellenaufenthaltszeit
t_1	Beschleunigungszeit
t_2	Fahrzeit mit konstanter Geschwindigkeit
t_3	Verzögerungszeit
t_1^*	Reisezeit pro Kilometer mit Personenwagen
TE_1	Abkürzung, Gleichung 2.72
TE_2	Abkürzung, Gleichung 2.73
TE_3	Abkürzung, Gleichung 2.74
TE_4	Abkürzung, Gleichung 2.75
TE_5	Abkürzung, Gleichung 2.76
TE_6	Abkürzung, Gleichung 4.8
TE_7	Abkürzung, Gleichung 4.9
TE_8	Abkürzung, Gleichung 4.10
TE_9	Abkürzung, Gleichung 4.11
u	Windgeschwindigkeit
v	Geschwindigkeit
v_0	Höchstgeschwindigkeit
v_1	Reisegeschwindigkeit Personenwagen
v_2	Reisegeschwindigkeit Bus
$V_{Ö}$	Verkehrsleistung für Verkehrsmittel mit Fahrtunterbruch = öffentliche Verkehrsleistung

V_p	Verkehrsleistung für Verkehrsmittel ohne Fahrtunterbruch = private Verkehrsleistung
V	Gesamtverkehrsleistung beider Verkehrsmittel
y_1	Anzahl Personenwagen
y_2	Anzahl Busse
Z	Funktionsbezeichnung, Gleichungen 2.62 und 4.14
Z	Zeitwert, Kapitel 4
α	Konstante, Gleichung 3.32
β	Konstante, Gleichung 3.32
γ	Konstante, Gleichung 3.32
μ	Grundwiderstandsbeiwert, Gleichung 3.3
λ	Lagrange-Faktor, Gleichungen 2.62 und 4.14
σ	Substitutionselastizität, Gleichung 2.65

Abkürzungsverzeichnis

AASHO	American Association of State Highway Officials
ACS	Automobilclub der Schweiz
AfRZ	Amt für Raumplanung des Kantons Zürich
AfVZ	Amt für Verkehr der Stadtpolizei Zürich
BGE	Bundesgerichtsentscheid
BMI	Bundesministerium des Innern (Bundesrepublik Deutschland)
CV	Compensating Variation
dB	Dezibel
DK	Durchschnittskosten
DTV	Durchschnittlicher täglicher Verkehr
EAV	Eidgenössisches Amt für Verkehr
EDMZ	Eidgenössische Drucksachen und Materialzentrale
Esta	Eidgenössisches Statistisches Amt
EV	Equivalent Variation
FRS	Schweizerischer Strassenverkehrsverband
GDI	Gottlieb Duttweiler Institut
GE	Geldeinheiten
GK	Grenzkosten
GVK	Gesamtverkehrskonzeption
JbCH	Statistisches Jahrbuch der Schweiz
JbSZ	Statistisches Jahrbuch der Stadt Zürich
ppm	parts per million
PW	Personenwagen
PWE	Personenwageneinheiten
LW	Lastwagen
RWS	Richtlinien für wirtschaftliche Vergleichsrechnungen im Strassenwesen
SASZ	Statistisches Amt der Stadt Zürich
TA	Technische Anleitung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VBZ	Verkehrsbetriebe der Stadt Zürich

Literaturverzeichnis

Apel, D. (1973), Kraftverkehr und Umweltqualität von Stadtstrassen, Schriftenreihe des Vereins für Kommunalwissenschaften, Band 46, W. Kohlhammer, Berlin

Ballmer, R. (1975), Versuch einer Erfassung der Strassenverkehrsunfallfolgekosten für die Schweiz 1972, Diss. Universität Genf, H. Lang, Bern

Baum, H. (1972), Grundlagen einer Preis-Abgabenpolitik für die städtische Verkehrsinfrastruktur, Buchreihe des Instituts für Verkehrswissenschaft an der Universität zu Köln, Band 28, Handelsblatt GmbH, Düsseldorf

Becker, G.S. (1965), An Economic Theory of the Allocation of Time. Economic Journal, Vol 75, S. 493-517

Beesley, M.E. (1965), The Value of Time Spent in Travelling: Some New Evidence, Economica, Vol. 32, S. 174-185

Binder, V. (1973), Bewertungskriterien für Infrastrukturbesserungen im Strassenverkehr, Schriften zur wirtschaftswissenschaftlichen Forschung, Band 67, A. Hein, Meisenheim am Glan

Böttcher, W. (1976), Die Reinhaltung der Luft als wirtschaftspolitisches Problem, Diss. TU Braunschweig

Bruckmayer, F. Lang, J (1971), Grundlagen für eine Lärmschutzzonung, Schriftenreihe der österreichischen Gesellschaft für Raumforschung und Raumplanung, Band 13, Springer, Wien

Buchta, E. (o.J.), Die Verteilung der Verkehrsgeräusche im Strassenraum einer Grossstadt mit Lärmkarte von Düsseldorf, Forschungslaboratorium für medizinische Akustik der HNO Universitätsklinik Düsseldorf

Bürcher, B. (1976), Der Agglomerationsprozess in der Schweiz, DISP Nr. 43, ORL-Institut ETH Zürich S. 34

Claffey, P.J. (1971), Running Costs of Motor Vehicles as affected by Road Design and Traffic, National Cooperative Highway Research Program Report, Nr. 111, Highway Research Board, Washington D.C.

Dathé, H.M. (1969), Eine Analyse internationaler Strassenunfallzahlen 1950 - 66, Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Vol. 15, S. 187-195

Dawson, R.F. (1967), Cost of Road Accidents in Great Britain, Road Research Laboratory Report, LR 79, Crowthorne

Dawson, R.F. (1971), Current Cost of Road Accidents in Great Britain, Road Research Laboratory Report, LR 396, Crowthorne

Deckert, P.
Hartenstein, W. (1971), Verkehrsmittel im Berufsverkehr, Schriftenreihe des Verbandes der Automobilindustrie, Nr. 10, Frankfurt a. Main

Deuber, A. (1977), An athmospheric diffusion model for short distances and complicated topography, Proceedings of the fourth International Clean Air Congress, S. 224-226, Tokio

Deuber, A. (1977a), Gasförmige Emissionen von Motorfahrzeugen und Luftstoffkonzentrationen in Strassennähe unter variablen Bedingungen, Staub-Reinhaltung der Luft, Vol. 37, S. 251-257

Deuber, A. (1977b), u.a., Die räumliche Verteilung von Motorfahrzeugabgasen in Situationen unterschiedlicher Bebauung, Wasser, Energie, Luft, Vol 69, S. 31-38

Deuber, A. (1977c), Die Berechnung von Immissionskonzentrationen gasförmiger Luftverunreinigungen am Strassenrand, Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie, 3. Informationstagung über lufthygienische Untersuchungen in der Schweiz

Dietrich, K
Graf, U.
Rotach, M (1975), Strassenprojektierung, IVT-ETHZ, Zürich

Dietrich, K
Spacek, P. (1977), Sicherheit im Strassenverkehr, IVT-ETHZ, Zürich

Dreihaupt, F.J. (1971), Luftreinhaltung als Faktor der Stadt- und Regionalplanung, Schriftenreihe Umweltschutz, Band 1, TÜV Verlag, Köln

Dreihaupt, F.J. (1974), Anteil des Kraftverkehrs an den Luftverunreinigungen in einer Grossstadt, Schriftenreihe des Vereins für Wasser-, Boden- und Lufthygiene, Nr. 42, Stuttgart

Dreissigacker, H.L. (1974), u.a., Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft, Mit Erläuterungen, C. Heymann Verlag, Köln

Eggensberger, D. (1975), Beurteilung der Lärmimmissionen an innerstädtischen Strassen, Kampf dem Lärm, Vol. 22, S. 160-162

Evans, A.W. (1972), On the Theory of the Valuation and Allocation of Time, Scottish Journal of Political Economy, Vol. 19, S. 1-17

Everall, P.F. (1968), The Effect of Road and Traffic Conditions on Fuel Consumption, Road Research Laboratory Report, RL 226, Crowthorne

Fässler, K.
Rehkugler, H.
Wegenast, C. (1971), Kostenrechnungslexikon, Moderne Industrie, München

Geiger, M. (1971), Ermittlung des Zeitgewinnes im Verkehr und seine volkswirtschaftliche Bewertung, Institut für Verkehrswissenschaft und öffentliche Wirtschaft, München

Goodwin, P.B. (1973), On the Evaluation of Human Life in Accident Studies, Accident Analysis and Prevention, Vol. 5, S. 287-293

Goodwin, P.B. (1976), Value of Time, European Conference of Ministers of Transport, Paris

Grandjean, E.
Gilgen, A. (1973), Umwelthygiene in der Raumplanung, Ott Verlag, Thun und München

Gruber, J. (1975), Lärm: Wirkungen und Bewertung, Fortschrittsberichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 11, Nr. 19, Düsseldorf

Gwynn, D.W. (1967), Relationship of Accident Rates and Accident Involvements with Hourly Volumes, Traffic Quarterly, Vol. 21, S. 407-418

Harrison, A.H.
Quarmby, D.A. Recherches théoriques et pratiques sur une évaluation exacte des gains de temps, Sixième table ronde, Conférence européenne des ministres des transports, Paris

Hause, J.C. (1975), The Theory of Welfare Cost Measurement, Journal of Political Economy, Vol. 83, S. 1145-1182

Heggie, J.G. (1976), Modal Choice and the Value of Travel Time, Clarendon Press, Oxford

Heinemann, K. (1966), Externe Effekte der Produktion und ihre Bedeutung für die Wirtschaftspolitik, Volkswirtschaftliche Schriften, Heft 99, Duncker und Humblot, Berlin

Helms, E.
Voigt, F. (1970), Die gesamtwirtschaftliche Problematik steigender Verkehrsunfälle. Die volkswirtschaftlichen Kosten der Verkehrsunfälle, Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 2138, Westdeutscher Verlag, Köln

Henderson, J.M.
Quandt, R.E. (1973), Mikroökonomische Theorie, Eine mathematische Darstellung, 3. neubearbeitete und erweiterte Auflage, Verlag Franz Vahlen, München

Hensher, D.A.
Hotchkiss, W.E. (1974), Choice of Mode and the Value of Travel Time Savings for the Journey to Work, The Economic Record, Vol. 51, S. 101

Hensher, D.A. (1977), Review of Studies Leading to Existing Values of Travel Time, Transportation Research Record, Nr. 587, Washington, D.C., S. 30-41

Hess, W.
Haerter, A. Messtechnisch begründeter Modellvorschlag zur Berechnung der Ausbreitung von CO-Abgasen aus Kraftfahrzeugen an verkehrsreichen Strassen, VDI Bericht, Nr. 200, Düsseldorf

Hicks, J.R. (1943), The Four Consumer's Surpluses, Review of Economic Studies, Vol. 11, S. 31-41

Hollatz, J.W.
Tamms, F. (1965), Die kommunalen Verkehrsprobleme in der BRD. Ein Sachverständigenbericht und die Stellungnahme der Bundesregierung. Vulkan Verlag, Essen

Hottenstein, H. (1969), Das Parkierungsproblem in ökonomischer Sicht, Zürcher volkswirtschaftliche Forschungen, NF, Band 16, Polygraphischer Verlag, Zürich

Iblher, P.
Jansen, G. (1972), Die Bewertung städtischer Entwicklungsalternativen mit Hilfe sozialer Indikatoren - Dargestellt am Beispiel der Stadt Zürich, Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen

Jenny + Vorhees AG (1977), Basis Modell, Arbeitsinstrument für die Verkehrsprognose und die Umweltanalyse, Zürich

Johnson, D.R.
Saunders, E.G. (1968), The Evaluation of Noise from freely flowing Road Traffic, Journal of Sound and Vibration, Vol. 7, S. 287-309

Johnson, W.B. (1973), u.a., An Urban Diffusion Simulation Model for Carbon Monoxide, Journal of the Air Pollution Control Association, Vol. 23, S. 490-498

Kentner, W. (1972), Planung und Auslastung der Verkehrsinfrastruktur in Ballungsräumen, Buchreihe des Instituts für Verkehrswissenschaft an der Universität zu Köln, Band 29, Handelsblatt GmbH, Düsseldorf

Kentner, W. (1972a), Die Verkehrssicherheit als wirtschaftliche Planungsgrösse, Strasse und Autobahn, S. 642-647

Klosterkötter, W. (1973), Lärmwirkungen und Lebensqualität, Kampf dem Lärm, Vol. 20, S. 113-124

Klosterkötter, W. (1974), u.a., Medizinische Untersuchungen über die Belastbarkeit von Menschen durch Geräusche im Hinblick auf die Emissionsrichtwerte, Schriftenreihe "Städtebauliche Forschung", Heft 31, Bonn

Knelson, J.H. (1972), Luftqualitätskriterien und Immissionsgrenzwerte für Kohlenmonoxid in den Vereinigten Staaten, VDI Berichte, Nr. 180, Düsseldorf

Knelson, J.H. (1975), Medizinische Grundlagen des Grenzwertes für NO_2 Immissionen in den USA, Staub-Reinhaltung der Luft, Vol. 35, S. 178-184

Lauber, A.
Hofmann, R. (1976), Lärmbekämpfung, EMPA, Dübendorf

Legat, W. (1968), Kraftfahrzeugleistungen und Unfallrisiken, Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Vol. 14, S. 223-233

Leutzbach, W. (1970), Ueber den Zusammenhang zwischen Risikoverhalten und Auffahrunfällen auf Bundesautobahnen, Fragen der Verkehrssicherheit, Schriftenreihe der DVWG, Nr. B8, Köln

Leutzbach, W. (1972), Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York

Marburger, E.A. (1974), Die ökonomische Beurteilung der städtischen Umweltbelastung durch Automobilabgase - Methoden und Quantifizierungsversuche, Buchreihe des Instituts für Verkehrswissenschaft an der Universität zu Köln, Band 30, Handelsblatt GmbH, Düsseldorf

May, H.
Plassmann, E. (1973), Abgasimmissionen von Kraftfahrzeugen in Grossstädten und industriellen Ballungsgebieten, Schriftenreihe Umweltschutz, Band 3, TÜV Verlag, Köln

Melinek, S.J. (1974), A Method of Evaluating Human Life for Economic Purposes, Accident Analysis and Prevention, Vol. 6, S. 103-114

Meyer, A. (1977), Gesamtkosten von Strasse und Schiene, NZZ, 6. April 1977, Nr. 81

Meyer, K. (1971), Bewegliche Betriebskosten von PW in Abhängigkeit von den Strassen- und Verkehrsbedingungen, Arbeitsbericht Nr. 26 des Institutes für Orts-, Regional und Landesplanung an der ETHZ, Zürich

Meewes, V. (1974), Untersuchungen über die Betriebs- und Zeitkosten der Strassenbenutzer als Entscheidungshilfen für Investitionen im Strassenwesen, Dissertation der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

Mishan, E.J. (1967), Pareto Optimality and the Law, Oxford Economic Papers, S. 255-287

Mishan, E.J. (1971), The Postwar Literature on Externalities: An Interpretative Essay, Journal of Economic Literature, Vol. 11, S. 1-28

Mishan, E.J. (1975), Cost-Benefit-Analysis, G. Allen and Unwin, London

Nebelung, H. (1976), Spezifischer Energieeinsatz im Verkehr, Ermittlung und Vergleich der spezifischen Energieverbräuche, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen

Niklas, J. (1970), Nutzen-Kosten-Analysen von Sicherheitsprogrammen im Bereich des Strassenverkehrs, Schriftenreihe des Verbandes der Automobilindustrie (VDA), Nr. 7

Pelli, T. (1977), Emissionskataster für Motorfahrzeuge in der Schweiz 1970, Bericht und Technische Beilagen, Eidg. Amt für Umweltschutz, Bern

Pfundt, K. (1969), Vergleichende Unfalluntersuchungen auf Landstrassen, Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 82, Bonn

Pfundt, K. (1970), Vergleichende Unfalluntersuchungen, Fragen der Verkehrssicherheit, Schriftenreihe der DVWG, Nr. B8, Köln, S. 184-199

Plath, F. (1977), Nutzen-Kosten-Analyse für städtische Verkehrsprojekte, J.C.B. Mohr, Tübingen

Predöhl, A. (1961), Verkehr, Handwörterbuch der Sozialwissenschaften, 11. Band, Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen

Prigge, E. (1968), Praktische Möglichkeiten einer optimalen Nutzung der Verkehrsflächen in den Städten, Vorträge und Studien aus dem Institut für Verkehrswissenschaft an der Universität Münster, Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen

Pucher, R. (1963), Methoden zur Hebung der Sicherheit im Strassenverkehr, Forschungsarbeiten aus dem Strassenwesen, N.F., Heft 56, Bad Godesberg

Pusch, R.H. (1973), Oekonomie des Faktors Zeit im Personenverkehr, Ein methodenkritischer Beitrag, H. Lang, Bern

Quarmby, D.A. (1967), Choice of Travel Mode for the Journey to Work, Journal of Transport Economics and Policy, Vol. 1, S. 273-314

Rathé, E.J. (1966), Ueber den Lärm des Strassenverkehrs, Acustica, Vol. 17, S. 268-277

Richrath, K. (1974), Siedlungsstruktur und Nahverkehr in Agglomerationen. Zur Kritik städtebaulicher Planungskonzepte unter dem Aspekt des Personenverkehrs, Diss. Universität Karlsruhe

Ridker, R.G.
Henning, J.A. (1967), The Determinants of Residential Property Values with Special Reference to Air Pollution, Review of Economics and Statistics, Vol. 49

Rucker, A. (1975), Strassenverkehrslärm in Wohngebieten, Kampf dem Lärm, Vol. 22, S. 72-81

Sälzer, E. (1975), Städtebaulicher Schallschutz, Möglichkeiten und Bewertung von städtebaulichen Massnahmen zur Minderung der Lärmbelastung, Bau Verlag, Wiesbaden

Schlatter, Ch.
Bauer, D. (1977), Die Auswirkungen der Motorenabgase auf den Menschen, Touring, Nr. 25 und 26, je S. 5

Schlipköter, H.W.
Pott, F. (1976), Die Bleibelastung des Menschen und ihre Bedeutung für die Gesundheit, Umweltbrief Nr. 15, S. 19-39, Bonn

Siegert, H. (1975), Entwicklung einer Methode zur Erfassung und Bewertung der emittierten Kohlenwasserstoffe aus Verbrennungsprozessen, Diss. Technische Universität Clausthal

Schwerdtfeger, W.
Zimolong, B. (1973), Technische und psychologische Bedingungen der Unfallverhütung im Strassenverkehr, Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Vol. 19, S. 143-162

Smeed, R.J. (1964), Ministry of Transport (Hrsg.), Road Pricing, The Economic and Technical Possibilities, HMSO, London

Smeed, R.J. (1974), The Frequency of Road Accidents, Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Vol. 20, S. 95-108 und 151-159

Sommer, H.J. (1977), Luftverunreinigung durch Stickoxide in der Umgebung von Strassen, Diss. ETHZ, Nr. 5902

Spary, P. (1968), Wachstums- und Wohlstandseffekte als Entscheidungskriterien bei öffentlichen Strassenbauinvestitionen, Finanzwissenschaftliche Forschungsarbeiten, N.F., Heft 37, Berlin

Stephenson, R.J. Vulkan G.H. (1968), Traffic Noise, Journal of Sound and Vibration, Vol. 7, S. 247-262

Sulger Büel, H. (1972a), Die kostengerechte Abgabenbelastung des Motorfahrzeugverkehrs in der Schweiz, Diss, St. Gallen, H. Lang, Bern

Sulger Büel, S. (1972), Abnützung von Strassenbelägen durch den Verkehr, unter besonderer Berücksichtigung von Spikesreifen, Mitteilung Nr. 23 des Institutes für Strassenbau an der ETH Zürich

Thomas, C.T. (1968), Value of Time for Commuting Motorists, Highway Research Record, Nr. 245, S. 17-35, Washington D.C.

Thomas, C.T. Thompson, G.I. (1971), Value of Time Saved by Trip Purpose, Highway Research Record, Nr. 369, Washington D.C.

Walters, A.A. (1961), The Theory and Measurement of Private and Social Cost of Highway Congestion, Econometrica, Vol. 29, S. 676-699

Walther, K. (1973), Nachfrageorientierte Bewertung der Streckenführung im öffentlichen Personennahverkehr, Westdeutscher Verlag, Opladen

Webster, F.V. (1968), A Theoretical Estimate of the Effect of London Car Commuters Transferring to Bus Travel, RRL Report, Nr. 165, Crowthorne

Wehner, B. (1964), Die Kraftfahrzeug-Betriebskosten in Abhängigkeit von den Strassen- und Verkehrsbedingungen, W. Ernst und Sohn, Berlin

Willeke, R. Bögel, H.D. Engels, K. (1967), Möglichkeiten einer Wirtschaftlichkeitsrechnung im Strassenbau unter besonderer Berücksichtigung der Unfallkosten, Forschungsberichte des Instituts für Verkehrswissenschaft an der Universität zu Köln, Heft 11, Handelsblatt GmbH, Düsseldorf

Willeke, R. (1969), Auf dem Wege zu einer neuen Nahverkehrskonzeption, Internationales Verkehrswesen, Vol. 21, S. 45-48

Willeke, R. Kentner, W. (1975), Die Kosten der Umweltbelastung durch den Verkehrslärm in Stadtgebieten, Buchreihe des Instituts für Verkehrswissenschaft an der Universität zu Köln, Band 31, Verlag A. Hellendorn, Bentheim

Wittmann, W. Bülte, U. (1973), Die sozialen Kosten des Automobils in der Schweiz, GDI, Rüschlikon

Zipkes, E. (1973), Schäden durch den Gebrauch von Spikesreifen, Mitteilung Nr. 24 des Institutes für Strassenbau an der ETH Zürich

AASHO (1959), Hrsg., American Association of State Highway Officials, Road User Benefit Analysis for Highway Improvements, Washington D.C.

ACS (1975), Grundlagen der Betriebskostenberechnungen für Personenwagen, Automobilclub der Schweiz, Bern

AfRZ (1976), Umweltbelastung im Kanton Zürich, Expertenberichte, Amt für Raumplanung des Kantons Zürich

AfVZ (1974), Verkehrsunfälle 1974, Abteilung für Verkehr, Stadtpolizei Zürich

AfVZ (1975), Verkehrsunfälle 1975, Abteilung für Verkehr, Stadtpolizei Zürich

BMI (1974), Umwelt und Energie, Umweltbrief Nr. 9 vom 15.2.74, Bundeministerium des Innern, Bonn

EAV (1975), Schweizerische Verkehrsstatistik 1975, Hrsg: Eidgenössisches Amt für Verkehr, EDMZ, Bern 1976

Esta (383), Eidg. Volkszählung 1960, Statistische Quellenwerke der Schweiz, Heft 383, Bern, 1965

Esta (424), Schweizerische Strassenrechnung, Statistische Quellenwerke der Schweiz, Bern 1968

Esta (528), Strassenverkehrsunfälle in der Schweiz 1972 und Unfallbilanz seit 1963, Statistische Quellenwerke der Schweiz, Eidg. Statistisches Amt, Bern 1973

Esta (549), Eidg. Volkszählung 1970, Statistische Quellenwerke der Schweiz, Heft 549, Bern 1974

Esta (566), Motorfahrzeugbestand in der Schweiz am 30. September 1975, Statistische Quellenwerke der Schweiz, Bern 1975

Esta	(575), Strassenverkehrsunfälle in der Schweiz 1975, Statistische Quellenwerke der Schweiz, Eidg. Statistisches Amt, Bern 1976
Esta	(578), Schweizerische Strassenrechnung, Nach Motorfahrzeugkategorien gegliederte Ergebnisse 1970-1974, Statistische Quellenwerke der Schweiz, Bern 1976
FRS	(1976), 31. Tätigkeitsbericht der FRS, Schweizerischer Strassenverkehrsverband, Bern
GVK	(7), Perspektiven des Schweizerischen Verkehrswesens, 2 Bände, Bern/St. Gallen 1972
GVK	(13A), Nachträge Arbeitsunterlage Nr. 13, Bern, Sept. 1976
GVK	(84), Soziale Nutzen und Kosten des Verkehrs in der Schweiz, prognos, Basel 1977
JbCH	(1977), Statistisches Jahrbuch der Schweiz 1977, Birkhäuser Verlag, Basel 1977
JbSZ	(1976), Statistisches Jahrbuch der Stadt Zürich, 1976
Perspektiven	(1974), Entwicklungsperspektiven der Schweizerischen Volkswirtschaft bis zum Jahre 2000, Teil II, 2. Auflage, St. Gallen, Januar 1974
RWS	(1972), Richtlinien für wirtschaftliche Vergleichsrechnungen im Strassenwesen, Forschungsgesellschaft für das Strassenwesen, Köln
SASZ	(1975), Verkehrsunfälle in der Stadt Zürich im Jahre 1975, Statistisches Amt der Stadt Zürich
USA	(1971), National primary and secondary ambient air quality standards, The Federal Register 36: 8186-8201
VDI	(1974), VDI-Richtlinien, Maximale Immissionswerte, VDI 2310, Düsseldorf

Lebenslauf

Als Bürger von Chiasso wurde ich am 6. Januar 1945 in Promontogno geboren. Die Primar- und Sekundar- sowie einen Teil der Mittelschule absolvierte ich in Chur, den Rest an der Oberrealschule Zürich, wo ich im Herbst 1964 die Maturität (Typus C) erhielt. Nach einem durch Militärdienst und Praktika ausgefüllten Jahr immatrikulierte ich mich im Wintersemester 1965/66 an der Abteilung für Bauingenieurwesen an der ETH Zürich und schloss meine Studien im Herbst 1969 mit dem Diplom ab. Ab Januar 1970 war ich an verschiedenen Stellen der ETH tätig: Bis September 1972 als Assistent am Institut für Strassen- und Untertagbau, von Oktober 1972 bis Ende 1975 als Abteilungssekretär und von 1976 bis Juni 1978 am Institut für Verkehrsplanung und Transporttechnik. Vom Sommersemester 1970 bis 1975 war ich an der Rechts- und Staatswissenschaftlichen Fakultät der Universität Zürich eingeschrieben und erwarb mir das Lizentiat der Wirtschaftswissenschaften. Seit Juli 1978 arbeite ich bei der Schweizerischen Rückversicherungsgesellschaft als Ingenieur für die Beurteilung von Katastrophenrisiken.